

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
Отделение школы (НОЦ) Электроэнергетики и электротехники  
Профиль «Электропривод и автоматизация электротехнических комплексов и систем»

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Частотно-регулируемый асинхронный электропривод насоса системы водоснабжения

УДК 62-83-523:628.12

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Маурер Вячеслав Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЭЭ ИШЭ	Гусев Н.В.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Спицына Л.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ООД ШБИП	Фех А.И.	—		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Гарганеев А.Г.	д.т.н.		

**Результаты обучения**  
**по основной образовательной программе подготовки магистров**  
**13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения</b>
<b>P1</b>	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем.</i>
<b>P2</b>	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
<b>P3</b>	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, <i>объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
<b>P4</b>	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы</i> и их компоненты.
<b>P5</b>	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>P6</b>	Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
<b>P7</b>	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
<b>P8</b>	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>P9</b>	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>
<b>P10</b>	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
<b>P11</b>	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
<b>P12</b>	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники.</i>

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)

\_\_\_\_\_  
(Дата)

Гарганеев А.Г.  
(Ф.И.О.)

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Титульный лист Задание Реферат Введение Раздел 1 Технологический процесс автоматического поддержания давления воды в водопроводной системе Раздел 2 Описание насосов и особенности работы Раздел 3 Выбор оборудования Раздел 4 Расчет параметров и характеристик АД Раздел 5 Система автоматического управления электропривода Раздел 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Раздел 7 Социальная ответственность Заключение Список используемых источников Приложение А</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>- функциональная схема электропривода; - имитационная модель; - графики переходных процессов электропривода</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Фех Алина Ильдаровна
Иностранный язык	Качалов Николай Александрович
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
Основная часть, Финансовый менеджмент, Социальная ответственность – русский язык.	
Литературный обзор – иностранный язык.	

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	к.т.н.		29.01.2020 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Маурер Вячеслав Евгеньевич		29.01.2020 г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи выполненной работы:	17.06.2020 г.
--------------------------------	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.01.2020	Календарное планирование работ по теме	10
12.03.2020	Расчет энергетических параметров	20
05.04.2020	Анализ полученных данных	30
05.05.2020	Контроль качества выполнения проекта и консультирование студента	20
08.05.2020	Оценка эффективности проделанной работы	10
19.05.2020	Составление пояснительной записки	10
29.05.2020	Итог	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»	Гарганеев А.Г.	д.т.н.		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 149 с., 54 рисунка, 29 таблиц, 33 источника литературы, 1 приложение

Ключевые слова: ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, НАСОС, АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, ДАВЛЕНИЕ, СКАЛЯРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объектом исследования является система управления асинхронного электропривода насоса.

Цель работы – исследование системы скалярного управления асинхронного электропривода насоса в системе водоснабжения.

В процессе работы проводился расчет и построение нагрузочной характеристики, а также статических естественных и искусственных характеристик двигателя при изменении частоты питающего напряжения. Разрабатывалась имитационная модель системы скалярного управления насоса в среде MATLAB.

В результате исследования имитационной модели, сняты характеристики переходных процессов при различных отклонениях давления в системе.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2007 с использованием пакетов: Microsoft Visio 2007, Microsoft Excel, MATLAB R2007b, Mathcad 14, Microsoft Paint и представлена на бумаге формата А4.

## Оглавление

<b>Введение.....</b>	<b>10</b>
<b>1 Технологический процесс автоматического поддержания давления воды в водопроводной системе.....</b>	<b>13</b>
1.1 Описание технологического процесса.....	13
<b>2 Описание насосов и особенности работы.....</b>	<b>16</b>
2.1 Общие сведения.....	16
2.2 Конструкция и основные параметры.....	18
2.3 Системы регулируемых электроприводов насосов.....	23
2.4 Работа насоса и кавитация.....	25
2.5 Общие правила выбора насоса.....	31
<b>3 Выбор оборудования.....</b>	<b>36</b>
3.1 Выбор двигателя.....	36
3.2 Выбор насосного агрегата.....	37
3.3 Выбор преобразователя частоты.....	39
3.4 Выбор и обоснование датчика давления.....	42
3.5 Выбор контакторов и автоматов защиты.....	44
<b>4 Расчет параметров и характеристик АД.....</b>	<b>46</b>
4.1 Определение параметров Т-образной схемы замещения.....	46
4.2 Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик АД.....	52
<b>5 Система автоматического управления электропривода.....</b>	<b>54</b>
5.1 Скалярное управления. Закон Костенко.....	54
5.2 Расчет и построение механических и электромеханических характеристик АД для закона.....	58
5.3 Расчет потерь в асинхронном двигателе при работе на искусственных характеристиках.....	63
5.4 Расчет и построение естественных механических и электромеханических характеристик замкнутой системы «преобразователь частоты - асинхронный двигатель»	

с IR-компенсацией.....	66
5.5 Разработка системы скалярного управления насоса в системе MatLab.45.....	72
<b>6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....</b>	<b>94</b>
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	94
6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	94
6.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	96
6.1.3 SWOT-анализ.....	98
6.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	100
6.2.1 Контрольные события проекта.....	100
6.2.2 Планирование НИР.....	100
6.3 Бюджет научного исследования.....	103
6.3.1 Основная заработная плата (компенсация трудозатрат).....	103
6.3.2 Дополнительная заработная плата.....	104
6.3.3 Отчисления на социальные нужды.....	105
6.3.4 Прочие расходы.....	106
6.3.5 Накладные расходы.....	107
6.3.6 Амортизация.....	107
6.3.7 Полная смета затрат.....	107
6.4 Определение ресурсной и экономической эффективности Исследования.....	108
<b>7 Социальная ответственность.....</b>	<b>113</b>
7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения Безопасности.....	113
7.2 Производственная безопасность.....	115
7.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	116
7.3 Экологическая безопасность.....	123



7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	124
<b>Заключение.....</b>	<b>127</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>129</b>
<b>Приложение А.....</b>	<b>132</b>

## **Введение**

Энергосбережение (или рационализация производства, распределения и использования всех видов энергии) стало в последние годы одним из основных приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира. Энергосбережение в любой сфере сводится к снижению бесполезных потерь. Анализ структуры потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что определяющая потеря (до 90%) приходится на сферу потребления.

Электропривод, являясь энергосиловой основой современного производства, потребляет около 60% всей вырабатываемой электроэнергии, следовательно, основной эффект энергосбережения может быть получен в этой сфере. Большая часть электроэнергии потребляется электроприводами на основе повсеместно используемых асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором, для которых основным направлением энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому. Это направление принято в мировой практике и интенсивно развивается, чему активно способствуют два совпавших во времени события: наметившийся дефицит энергоресурсов и ощутимый рост их стоимости и выдающиеся успехи силовой электроники и микроэлектроники.

Из спектра различных решений, применяемых для энергосбережения, одно из наиболее эффективных и быстроокупаемых, требующих относительно небольших капиталовложений - внедрение высокотехнологичной и наукоемкой энергосберегающей техники - частотно-регулируемых асинхронных приводов, позволяющих оптимизировать режимы работы турбомеханизмов в широком диапазоне изменения нагрузок.

Центробежные вентиляторы, насосы и компрессоры объединяются в один класс нагрузочных механизмов для электропривода, так как их характеристики, с точки зрения требований и условий работы электропривода, имеют много общего.

Традиционные способы регулирования подачи насосных и вентиляторных установок состоят в дросселировании напорных линий и изменении общего числа работающих агрегатов по одному из технологических параметров - давлению на коллекторе или в диктующей точке сети, уровню в приёмном или регулирующем резервуаре и др. Эти способы регулирования направлены на решение технологических задач и практически не учитывают энергетических аспектов транспорта воды или газа.

Гидравлическое и электротехническое оборудование насосных и вентиляторных установок обычно выбирается по максимальным техническим параметрам (подаче, напору и др.). Однако в реальной жизни оказывается, что вновь вводимые в эксплуатацию эти установки выходят на проектные режимы в течение нескольких лет. Поэтому существующие станции нередко работают в режимах, отличающихся от расчётных. Кроме того, имеют место суточные, недельные и сезонные колебания расходов и напоров, обусловленные переменным водопотреблением, в результате этого рабочие режимы насосов оказываются вне рабочих зон их характеристик.

Поэтому с появлением надёжного регулируемого электропривода создались предпосылки для разработки принципиально новой технологии транспорта воды или газа с плавным регулированием рабочих параметров насосной или вентиляторной установок без непроизводительных затрат электроэнергии и с широкими возможностями повышения точности и эффективности технологических критериев работы систем подачи.

В настоящее время в приводах насосов, вентиляторов используются асинхронные двигатели, которые питаются от преобразователей частоты.

Таким образом, применение регулируемого электропривода турбомеханизмов позволяет создать новую технологию энергосбережения, в которой экономится не только электроэнергия, но и сберегается тепловая энергия и сокращается расход воды за счёт утечек её при превышениях давления в магистрали, когда расход мал.

Дополнительно новая технология энергосбережения в вентиляторных установках с большой суммарной мощностью позволяет регулировать мощность в часы максимума нагрузки и тем самым сократить затраты на электроэнергию. При частотном регулировании насосов можно в значительной степени избежать аварийные ситуации за счёт предотвращения гидравлических ударов, возникающих при изменении режимов работы и пуске системы при нерегулируемом электроприводе. Поэтому проводимые работы по переводу турбомеханизмов на регулируемый электропривод являются актуальными.

# 1. Технологический процесс автоматического поддержания давления воды в водопроводной системе

## 1.1 Описание технологического процесса

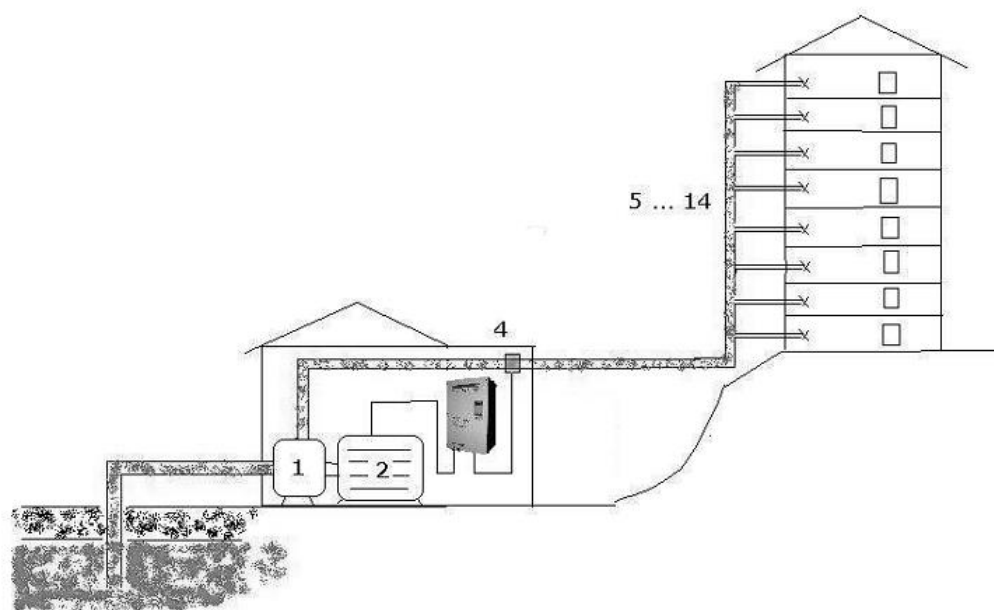


Рисунок 1 – Схема технологического процесса

Система водоподачи состоит из насоса 1, приводимого в движение электродвигателем 2. Насос и электродвигатель размещены в здании насосной станции. Преобразователь частоты 3 управляет электродвигателем. Давление в водопроводной сети измеряется датчиком давления 4, сигнал обратной связи с которого поступает на ПЧ. Заданное значение давления устанавливается на пульте управления ПЧ.

В течение суток расход воды  $Q$  значительно изменяется (краны 5-14 открываются и закрываются). Максимальный (пиковый) расход воды приходится на утренние и вечерние часы, в то время как ночью расход практически нулевой и днем также небольшой. Если действующее давление воды в водопроводной сети при каком-то расходе отличается от заданного, то преобразователь частоты плавно изменяет скорость вращения двигателя и насоса так, чтобы при другом расходе (потреблении) обеспечить давление в сети. Таким образом, давление кранах поддерживается постоянным.

Преимущества использования ПЧ при поддержании заданного давления:

- снижение потребления электроэнергии,
- исключение гидроударов в сети и как следствие снижение количества аварий на трубопроводах,
- устранение ударных нагрузок на электрическую сеть при пуске электропривода.

Примерный суточный график водопотребления представлен на рисунке 2.

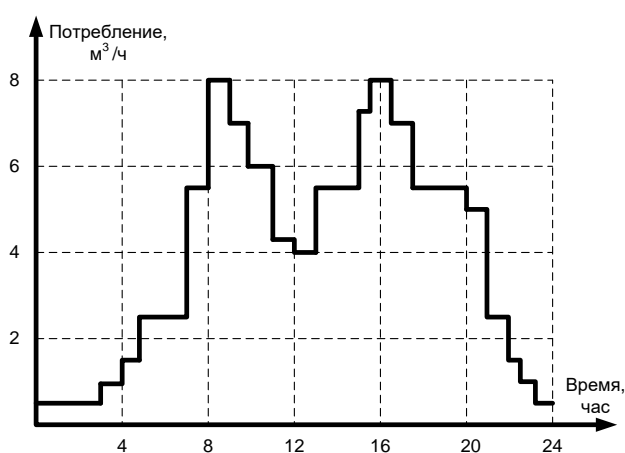


Рисунок 2 – График водопотребления

Плавное регулирование производительности используется, как правило, только для одного из имеющихся в составе установки насосных агрегатов. При недостатке диапазона регулирования (например, мощность регулируемого двигателя увеличивается до максимальной, но это так и не приводит к нужному увеличению давления) происходит изменение числа включенных в работу насосных агрегатов (включается дополнительный насосный агрегат, а мощность регулируемого – начинает вновь плавно увеличиваться).

Применение регулируемого асинхронного электропривода для управления насосными агрегатами может обеспечить:

- плавный пуск электродвигателя, отсутствие механических нагрузок на двигатель и бросков тока в сети;

- отсутствие гидравлических ударов;
- эффективное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне регулирования;
- обеспечение коэффициента мощности двигателя насоса на значениях, близком к 1,0;
- снижение уровня шума при пуске и работе;
- обеспечение автономной и безопасной работы, интеграция в АСУ ТП.

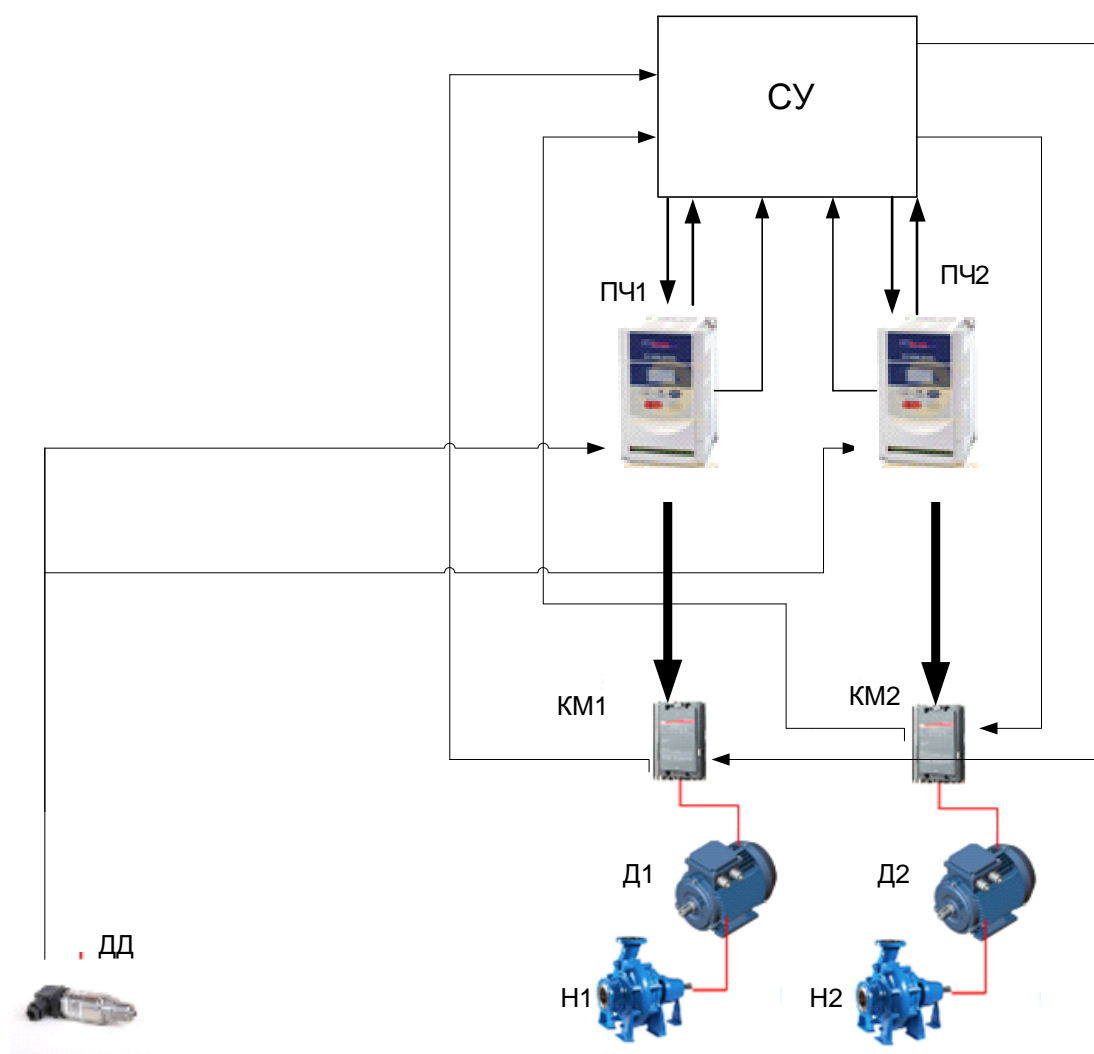


Рисунок 3 – Структурная схема АСУ ТП насосной станции

СУ – Система управления; ПЧ – Преобразователь; КМ – Контактор; Д – Двигатель; Н – Насос; ДД – Датчик давления.

По функциональному назначению управление технологическим процессом разделяется на три уровня:

1. Верхний уровень – автоматизированное рабочее место оператора на базе пульта управления насосами (ПУН);

2. Средний уровень – реализация обработки информации от измерительной системы нижнего уровня и формирование управляющего сигнала для исполнительных приводов (в том числе исполнительных элементов автоматики);

3. Нижний уровень – исполнительный электропривод, который входит в технологическое оборудование.

На верхнем уровне система управления вырабатывает технологическое задание на движение рабочих органов отдельной технической установки или целой технологической системы.

Средний уровень обеспечивает программное движение исполнительных приводов, движение по заданной траектории в пространстве управляемых переменных.

На нижнем уровне определяется технологическое оборудование, непосредственно участвующее в технологическом процессе, пространство управляемых и регулируемых переменных технологического оборудования.

## **2. Описание насосов и особенности работы**

### **2.1 Общие сведения**

Насосами называются машины, служащие для перекачки и создания напора жидкостей всех видов, механической смеси жидкостей с твердыми и коллоидными веществами и газов. Следует заметить, что машины для перекачки и создания напора газов (газообразных жидкостей) выделены в отдельные группы и получили название вентиляторов и компрессоров.

Насосные агрегаты (насосы) применяются во всех отраслях промышленности, сельском и коммунальном хозяйстве, на транспорте и в бытовых целях. Насосы относятся к классу энергетических машин, в



которых механическая энергия привода преобразуется в энергию потока жидкости ( в том числе и с определенным процентом твердых включений).

По принципу действия насосы подразделяются на две основные группы: динамические и объемные.

К динамическим относят насосные агрегаты, где жидкость под воздействием гидродинамических сил перемещается в камере постоянно сообщающихся с входом и выходом насоса.

В объемных – перемещение рабочей среды осуществляется под воздействием поверхностного давления при периодическом изменении объема насосной камеры попеременно сообщающейся с входом и выходом насоса.

В группу динамических относят: лопастные (центробежные и осевые насосы), насосы трения (вихревые, дисковые, червячные гидроструйные), инерционные(вибрационные).

К объемным насосам относятся – насосы возвратно-поступательного действия (поршневые, плунжерные), а также ротационные (шестеренчатые и винтовые).

Центробежные насосы классифицируют по:

1) числу колес (одноколесные многоколесные); кроме того, одноколесные насосы выполняют с консольным расположением вала – консольные;

2) напору (низкого напора до 2 кгс/см<sup>2</sup> (0,2 МН/м<sup>2</sup>), среднего напора от 2 до 6 кгс/см<sup>2</sup> (от 0,2 до 0,6 МН/м<sup>2</sup>), высокого напора больше 6 кгс/см<sup>2</sup> (0,6 МН/м<sup>2</sup>));

3) способу подвода воды к рабочему колесу (с односторонним входом воды на рабочее колесо, с двусторонним входом воды (двойного всасывания));

4) расположению вала (горизонтальные, вертикальные);

5) способу разъема корпуса (с горизонтальным разъемом корпуса, с вертикальным разъемом корпуса);

6) способу отвода жидкости из рабочего колеса в спиральный канал корпуса (спиральные и турбинные). В спиральных насосах жидкость отводится непосредственно в спиральный канал; в турбинных жидкость, прежде чем попасть в спиральный канал, проходит через специальное устройство – направляющий аппарат (неподвижное колесо с лопатками);

7) степени быстроходности рабочего колеса (тихоходные, нормальные, быстроходные);

8) роду перекачиваемой жидкости (водопроводные, канализационные, кислотные и щелочные, нефтяные, землесосные и др.);

9) способу соединения с двигателем (приводные (с редуктором или со шкивом), непосредственного соединения с электродвигателем с помощью муфт). Насосы со шкивным приводом встречаются в настоящее время редко.

## 2.2 Конструкция и основные параметры

Основными частями центробежного насоса (рис. 4) являются: корпус 6 насоса со всасывающим 1 и нагнетательным 3 патрубками. Внутри корпуса имеется рабочее колесо 4, жестко посаженное на вал 2. В корпусе вокруг рабочего колеса смонтирован направляющий аппарат 5.

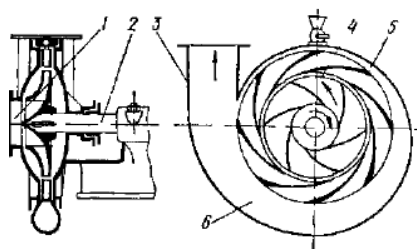


Рисунок 4 – Схема Центробежного насоса

Корпус насоса с патрубками служит для подхода жидкости к рабочему колесу и для отвода жидкости после воздействия на нее рабочего колеса в нагнетательный трубопровод. При вращении рабочее колесо своими лопастями непосредственно воздействует на жидкость, а также создает внутри насоса поле центробежных сил за счет энергии двигателя.

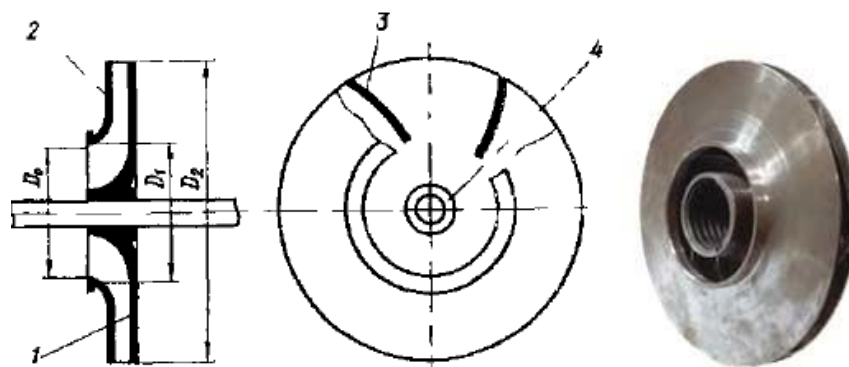


Рисунок 5 – Рабочее колесо

Обычно рабочее колесо центробежного насоса (рис. 5) представляет собой два диска: один плоский со втулкой, а второй имеет вид широкого кольца 2. Между дисками смонтированы лопасти 3 рабочего колеса, образующие расширяющиеся каналы. В центральной части колеса имеется втулка 4, при помощи которой оно монтируется на валу. Все перечисленные элементы рабочего колеса изготавливаются в виде единой отливки либо при помощи сварки. Рабочее колесо чаще всего выполняется литым из чугуна или бронзы, реже из литой стали, а в специальных случаях, для перекачки едких жидкостей, из свинца, каучука, эбонита, керамики и тому подобных материалов. По причине малой доступности внутренних каналов рабочих колес обработка их возможна только ручным способом, а поэтому весьма важно иметь чистую отливку. От того, насколько тщательно может быть произведена обработка и зачистка рабочих поверхностей колеса, зависит к.п.д. и степень кавитационной устойчивости насоса. С этой стороны применение бронзы более предпочтительно. Она лучше лется и обрабатывается. По условиям прочности в чугунных колесах окружные скорости допустимы не более 40—50 м/сек. В бронзовых они могут быть несколько большими и при хорошем ее качестве достигают значений 80 м/сек. По своей конструкции рабочие колеса бывают закрытыми или открытыми, т. е. без покрывного диска с открытыми лопатками. Лопатки могут быть цилиндрическими или пространственными с поверхностью двойной кривизны. Открытые колеса, как правило, применяются при низких

давлениях и особенно густых или загрязненных жидкостях, что удобно в смысле доступности каналов рабочего колеса для очистки.

В нормальных центробежных насосах колеса делаются закрытого типа, так как отсутствие покрывного диска снижает создаваемый колесом напор и увеличивает щелевые перетоки жидкости. В закрытых колесах оба его диска обычно отливаются заодно с лопатками, хотя встречаются клепаные колеса, преимущественно в малых размерах.

В крупных насосах рабочие лопатки иногда изготавливаются штампованными из стали и заливаются в чугунный обод. В колесах быстроходностью до  $ns=100$  лопатки колеса имеют изгиб в одной плоскости, т. е. их поверхности цилиндрические.

С увеличением степени быстроходности и уменьшением отношения – в целях увеличения рабочей поверхности лопатки ее входная кромка начинается почти от втулки. Так как при этом все точки кромки будут обладать различными окружными скоростями, поверхность лопатки получается сложной кривизны.

На валу рабочее колесо закрепляется обычно одной или двумя шпонками, реже при помощи резьбы.



Рисунок 6 – Вал насоса

Вал насоса обычно изготавливается из ковanej мартеновской стали, а в ответственных случаях из легированной с добавлением хрома, никеля, ванадия. Для защиты вала от износа или непосредственного воздействия жидкости он иногда облицовывается втулками, а в сильно коррозирующей среде выполняется из специальных сортов нержавеющей стали.

Ввиду высоких чисел оборотов центробежных насосов их валы рассчитываются на критическое число оборотов. Валы бывают жесткие, если их рабочие числа оборотов лежат ниже критических, и гибкие, если они выше критических. Гибкие валы в насосах применяются редко. Для обеспечения спокойного хода, а также возможности перехода через критическое число оборотов ротор насоса, т. е. вал с насаженными на него деталями (колеса, муфта, диски), должен быть тщательно статически, а иногда и динамически отбалансирован на особых станках. Достаточно очень небольшой неуравновешенности вращающихся масс, чтобы возникли колебания вала, вызывающие дополнительный его прогиб, опасный для прочности вала.



Рисунок 7 – Сальники

Сальники устанавливаются в пространстве между кожухом и валом в месте его выхода из насоса наружу и служат целям уплотнения. Сальник, расположенный со стороны всасывания, не должен пропускать в насос воздух. Сальник со стороны нагнетания должен предотвращать утечку жидкости из насоса. Нормально сальники центробежных насосов имеют мягкую набивку, материалом для которой служит пенька, хлопок, бумажная пряжа, асбестовый шнур, пропитанные салом вместе с графитом. Сальник со стороны всасывания снабжается водяным затвором, состоящим из кольца, к которому подводится жидкость из напорной линии, чем закрывается доступ воздуха внутрь насоса. В кислотных насосах подобный затвор осуществляется специальной жидкостью. При нагнетании жидкости с повышенной температурой сальники обязательно имеют охлаждающие рубашки.



Рисунок 8 – Подшипники

Подшипники центробежных насосов имеют преимущественно чугунные вкладыши с баббитовой заливкой. Смазка кольцевая, иногда с охлаждением масла водяной рубашкой или змеевиками. Широко применяются также шариковые и роликовые подшипники с жидкой или густой смазкой.

Здесь находят применение также подшипники с водяной смазкой: резиновые, текстолитовые, бакаутовые и др. Осевые силы, действующие на ротор насоса, воспринимаются шариковыми пятнами, а при значительных усилиях—пятнами трения типа Кингсбери или Мичелля.

Корпус насоса обычно выполняется из чугунного литья и только при давлениях выше 40—50 атм применяют стальное. Внутренние каналы корпуса должны иметь, возможно гладкие стенки, так как большая шероховатость при значительных скоростях движения жидкости может значительно понизить к. п. д. насоса. Как уже указывалось, корпус насоса может быть цельным с разъемом лишь по оси насоса или в виде отдельных секций, скрепляемых стяжными болтами. В первом случае литье более сложно, но в значительной мере облегчен монтаж насоса, так как не требуется разборки трубопроводов и при снятии крышки ротор целиком может быть вынут из корпуса. Для присоединения арматуры – манометра, вакуумметра, воздушных кранов для выпуска воздуха при заливке насоса, заливочных приспособлений, спускных кранов - корпус снабжается соответствующими отверстиями.

Направляющий аппарат в большинстве случаев, кроме чисто специальных целей, делают литым из чугуна. Бронзовый аппарат предпочтительнее в смысле возможности получения более гладких поверхностей его каналов и легкости их зачистки.

Уплотняющие кольца выполняются из чугуна, бронзы, а в случае возможного их износа при перекачке загрязненных жидкостей, также из стали с закалкой или цементацией. В современной практике стали применяться резиновые уплотняющие кольца.

Исходя из функционального назначения насоса, определяющими техническими параметрами являются подача и напор (давление).

Подача - это объем жидкости, подаваемой насосом в единицу времени, выраженной в м<sup>3</sup>/час (кубометров в час) или л/сек, (литров в секунду). Обозначается "Q".

Напор - это разность удельных энергий жидкости в сечениях после и до насоса, выраженная в метрах водного столба. Обозначается "H".

В насосах объемного типа пользуются понятием "давление", выраженным в атмосферах (кГс/см<sup>2</sup>) или мегапаскалях (МПа) (один мегапаскаль равен 10 атмосферам).

## **2.3 Системы регулируемых электроприводов насосов**

Технический прогресс в области регулируемого асинхронного электропривода стал возможным с появлением мощных полупроводниковых приборов - тиристоров (однооперационных и запираемых), мощных транзисторов (полевые МОП - транзисторы и биполярные транзисторы с изолированным затвором).

При нерегулируемом электроприводе насосов возможны следующие методы регулирования давления в водопроводе системы водоснабжения:

— поддержание давления с помощью дополнительных резервуаров воды на определённой высоте. При этом с помощью насоса поддерживается опре-

делённый уровень воды путём периодического включения и выключения двигателя насоса;

- регулирование выходящего напора из повышающей водонасосной станции путём перемещения задвижек трубопровода. При этом двигатель и насос работают постоянно с номинальной частотой вращения;

- ступенчатое регулирование числа работающих насосов параллельно или последовательно.

Перечисленные методы имеют недостатки:

- наличие дорогих сооружений водяных резервуаров;
- потери электроэнергии при неполной нагрузке двигателя при дроссельном регулировании трубопровода;
- наличие дополнительных устройств для управления задвижками.

Более рациональным методом поддержания постоянного давления, регулирования расхода воды (производительности насоса) является метод изменения частоты вращения колеса насоса. Регулированием скорости изменяются создаваемые напор и подача воды.

В зависимости от рода тока и разновидностей приводных двигателей турбомеханизмов существующие системы для изменения давления и производительности можно классифицировать следующим образом:

1. Приводные системы с двигателями постоянного тока.
2. Регулируемые приводные системы с синхронными двигателями.
3. Регулируемые приводные системы с асинхронными короткозамкнутыми двигателями (АД) на базе механических регуляторов скорости и электромагнитных муфт.
4. Приводные системы с многоскоростными АД.
5. Регулируемые приводные системы с асинхронными двигателями с фазным ротором.
6. Приводные системы с АД и регулятором напряжения.
7. Приводные системы с преобразователем частоты и АД.



В зависимости от технико-экономических показателей при переводе существующих нерегулируемых электроприводов турбомеханизмов на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором на регулируемый электропривод в наибольшей степени удовлетворяют приводные системы с регулятором напряжения и приводные системы с преобразователем частоты.

## 2.4 Работа насоса и кавитация

Рассмотрим работу технологического процесса, с точки зрения изменения параметров нагрузки сети  $Q_c$ . Для этого воспользуемся известными  $QH$  характеристиками для насосных агрегатов и сети (рис. 9). Кривая 1 соответствует напорной характеристике насосного агрегата, а кривая 2 – гидравлической характеристике сети, где  $H_0$  – требуемый статический напор сети. Точка пересечения этих характеристик является идеальной расчетной точкой совместной работы насосного агрегата и сети ( $Q_{ном}$ ). При изменении расхода в сети меняется и её гидравлическая характеристика – линии 3-5. Соответственно будут сдвигаться точки пересечения характеристик. Как видно из рисунка, с уменьшением расхода увеличивается давление в сети.

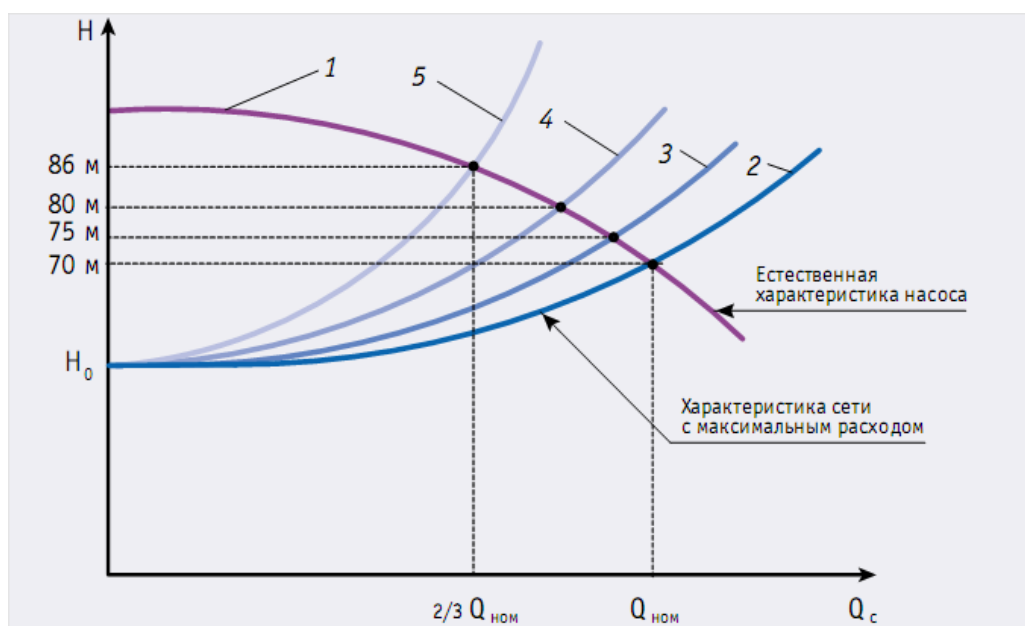


Рисунок 9 – Характеристика насосного агрегата и сети без регулирования давления

Кроме того, в процессе функционирования в зависимости от режимов работы системы может меняться давление перед насосом, создаваемое источником водоснабжения. Изменения этого давления также отражаются на величине давления в сети потребителей. Такой характер взаимосвязи параметров требует установки в системе дроссельных регулирующих элементов регулирующих клапанов (иногда их роль выполняют напорные задвижки агрегатов). Эти элементы создают дополнительное гидравлическое сопротивление и позволяют обеспечить стабильное давление в сетевом трубопроводе. При использовании дроссельных элементов происходит распределение напора на элементах системы. Это распределение напора показано на рис. 10, где  $\Delta H_d$  – падение напора на дроссельном элементе.

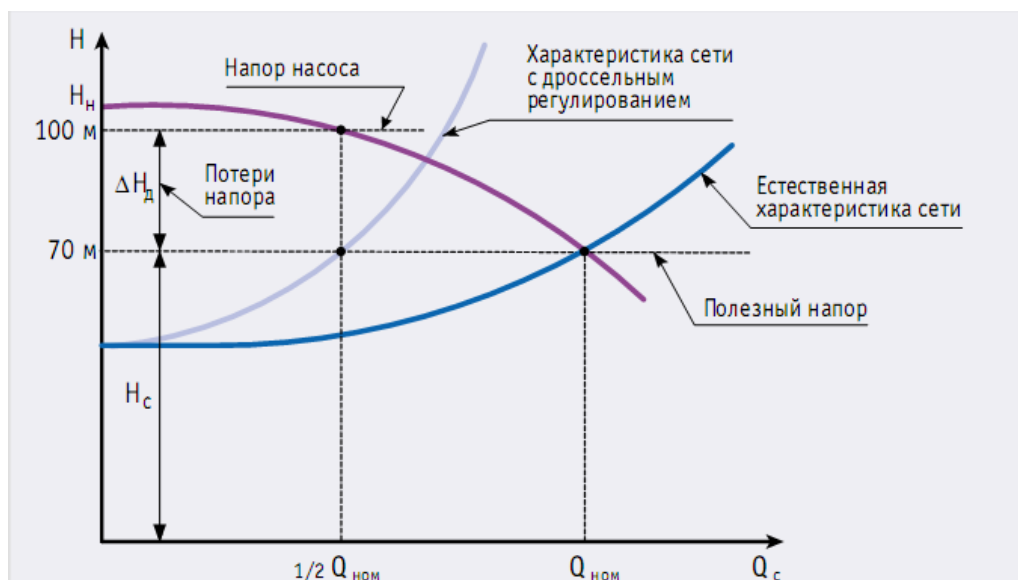


Рисунок 10 – Характеристика насосного агрегата и сети с дроссельным регулированием

Для поддержания заданного давления в сетевом трубопроводе при изменении расхода жидкости приходится изменять гидравлическое сопротивление регулирующего элемента. При этом общая гидравлическая характеристика будет иметь более крутой вид. Величина  $\Delta H_d$  с таким регулированием неуклонно увеличивается. Таким образом, чем глубже производится дросселирование регулирующим элементом, тем больше энергетических потерь имеет весь технологический процесс.

На величину потерь при дроссельном регулировании влияет не только регулирующий элемент: чаще всего на этапе проектирования выбирается насосный агрегат с определённым запасом напора, а при замене насосных агрегатов новое оборудование может иметь несколько завышенные напорные характеристики. Кроме того, диапазон изменения входных давлений (перед всасывающим патрубком насосного агрегата) оказывает влияние на величину давления за насосным агрегатом. Все эти обстоятельства приводят к тому, что потери энергии в ходе технологического процесса становятся достаточно большими, достигающими 45 и более процентов от номинальной мощности агрегата.

Для решения задачи минимизации потерь, связанных с регулированием давления в сети, необходимо исключить дополнительные гидравлические сопротивления на участке от насосного агрегата до сетевого трубопровода, то есть необходимо полностью открыть всю запорно-регулирующую арматуру. Это можно сделать, если процесс регулирования давления передать насосу агрегату. Теория работы нагнетателей (насосов и вентиляторов) доказывает, что изменение частоты вращения привода нагнетателя изменяет его напорные характеристики. Кроме того, напор, создаваемый нагнетателем, пропорционален квадрату частоты вращения агрегата. Изменение напорных характеристик насосного агрегата при изменении частоты вращения иллюстрирует рис. 11, на котором кривая 1 соответствует номинальной (при номинальной частоте вращения привода) напорной характеристике, а кривые 2-4 – напорным характеристикам при пониженной частоте вращения.

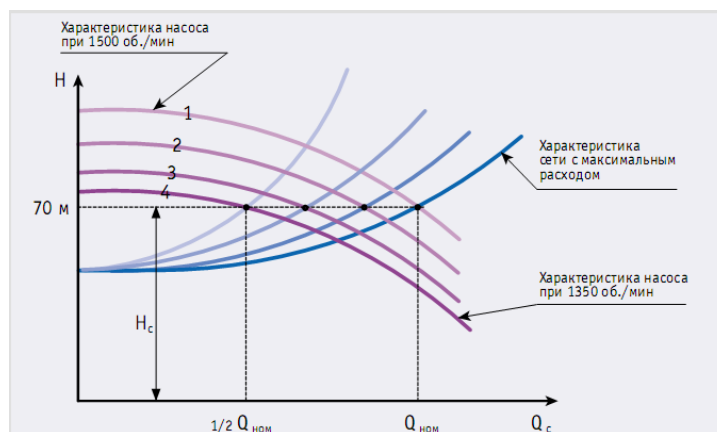


Рисунок 11 – Характеристика насосного агрегата и сети с частотным регулированием

Если организовать работу привода насосного агрегата таким образом, чтобы он при изменении параметров технологического процесса (расхода в сети и давления на входе агрегата) изменял частоту вращения, то в итоге можно без существенных потерь энергии стабилизировать давление в сети потребителей. При таком способе регулирования исключаются потери напора (нет дроссельных элементов), а значит, и потери гидравлической энергии.

Способ регулирования давления в сети путем изменения частоты вращения привода насосного агрегата снижает энергопотребление ещё и по другой причине. Собственно насос как устройство преобразования энергии имеет свой коэффициент полезного действия – отношение механической энергии, приложенной к валу, к гидравлической энергии, получаемой в напорном трубопроводе насосного агрегата. Характер изменения коэффициента полезного действия насоса  $\eta_n$  в зависимости от расхода жидкости  $Q$  при различных частотах вращения представлен на рис. 12.

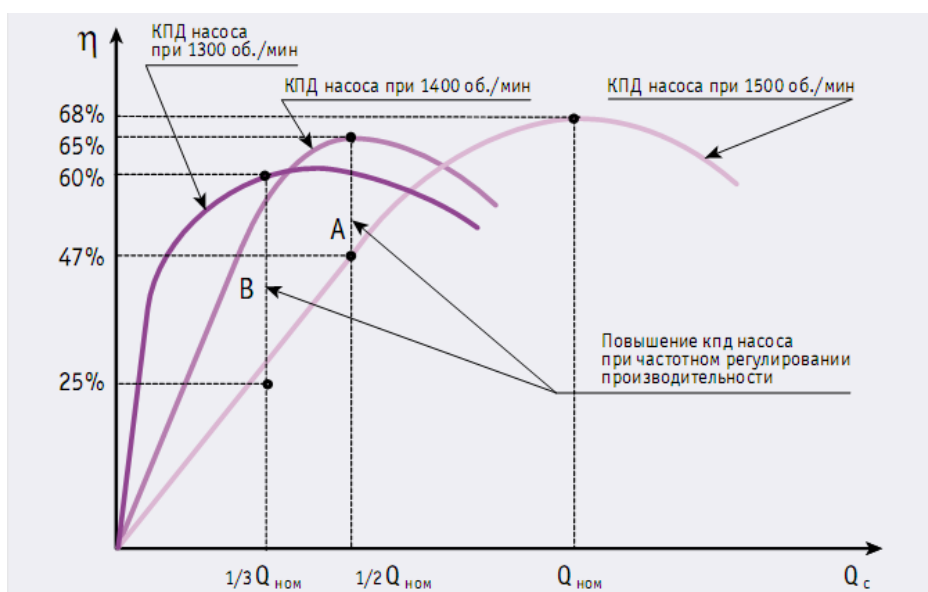


Рисунок 12 – Изменение кпд насосного агрегата с частотным регулированием при изменении производительности

В соответствии с теорией подобия максимум коэффициента полезного действия с уменьшением частоты вращения несколько снижается и смещается влево. Анализ требуемого изменения частоты насосного агрегата при изменении расхода в сети показывает, что с уменьшением расхода требуется снижение частоты вращения. Если рассмотреть работу агрегата для расхода меньше номинального (вертикальные линии A и B), то для этих режимов рационально работать на пониженной частоте вращения. В этом случае кпд насоса выше, чем при работе на номинальной частоте вращения. Таким образом, снижение частоты вращения в соответствии с технологической нагрузкой позволяет не только экономить потребляемую энергию на исключении гидравлических потерь, но и получить экономический эффект за счет повышения коэффициента полезного действия самого насоса – преобразования механической энергии в гидравлическую.

Кавитация в насосах объясняется нарушением сплошности жидкости в тех местах, где давление снижается до давления насыщенного пара при данной температуре, при этом происходит быстрое вскипание жидкости с образованием пузырьков пара, которые после перехода в зону повышенного давления и исчерпания кинетической энергии быстро сокращаются.

Сокращение кавитационного пузырька происходит с большой скоростью и сопровождается гидравлическим ударом и звуковым импульсом. Если кавитационные пузырьки замыкаются вблизи от обтекаемого тела, то многократно повторяющиеся удары приводят к разрушению поверхности этого тела (элементов проточной части насос). В местах разрушения пузырьков значения давления могут достигать  $10000 \text{ кгс/см}^2$  и сопровождаться сильным шумом со сплошным спектром от нескольких до тысяч килогерц.

Качественное изменение структуры потока, вызванное кавитацией, приводит к изменениям режима работы гидравлической машины. Эти изменения принято называть последствиями кавитации.

Элементы проточной части гидравлических машин представляют собой сочетание направляющих поверхностей, предназначенных для управления потоком. Если кавитационная зона возникает на такой поверхности, то она изменяет ее эффективную форму и, следовательно, изменяет путь потока. Такие изменения нежелательны и сопровождаются дополнительными потерями энергии. Снижение энергетических параметров (подача, напор) и уменьшение коэффициента полезного действия являются прямым следствием возникновения кавитации в любой гидравлической машине.

Борьба с кавитацией в насосах и других гидравлических машинах имеет большое значение, так как кавитация приводит к быстрому разрушению элементов проточной части и снижению их надежности.

Кавитационному разрушению подвержены все конструкционные материалы, но в разной степени. Наиболее кавитационно-стойким материалом является аустенитная сталь благодаря равномерности ее структуры. Кроме разрушения материала, кавитация приводит к существенному снижению КПД, повышению вибрации, ударным нагрузкам на элементы проточной части и, в конечном итоге, к срыву характеристик  $N$ ,  $N$  и КПД.

Основным средством предупреждения кавитации, обеспечивающим надежную работу насоса, является поддержание достаточного избыточного давления на входе в насос над давлением парообразования ( $P_v > P_p$ ), то есть соблюдение такой высоты всасывания насоса, при которой кавитация не возникает. Превышение напора на входе в насос над напором, равным давлению насыщенного пара перекачиваемой жидкости, называется кавитационным запасом  $\Delta h$ .

Бескавитационный режим работы насосов обеспечивается при соблюдении условия  $\Delta h \geq \Delta h_{\text{доп.}}$ , где допускаемый кавитационный запас  $\Delta h_{\text{доп.}} = k \times \Delta h_{\text{кр.}}$ ; коэффициент запаса  $k = 1,1 - 1,5$  устанавливается в зависимости от условий работы и типа насоса;  $\Delta h_{\text{кр.}}$  - кавитационный запас, соответствующий началу снижения параметров (первому критическому режиму кавитации) при кавитационном испытании насоса. Допускаемый кавитационный запас  $\Delta h_{\text{доп.}}$  приводится в характеристике насоса, получаемой при кавитационном испытании.

## **2.5 Общие правила выбора насоса**

В общем случае при выборе типа насосов и определении числа рабочих агрегатов необходимо учитывать совместную работу насосов, водоводов и сети и руководствоваться следующими соображениями:

1. Необходимо устанавливать как можно меньше рабочих насосов. Параллельная работа нескольких насосов экономически невыгодна, поэтому выгоднее установить крупные насосы, имеющие более высокие КПД, чем несколько средних и малых. Кроме того, суммарная подача нескольких насосов при параллельной работе на общие водоводы всегда меньше, чем сумма их подач при раздельной работе на данную систему.

2. Насосы должны работать в области наивысших значений КПД при длительной подаче. Кратковременные расходы могут подаваться с более низким КПД.

3. Целесообразно на насосных станциях устанавливать насосы одного типоразмера, что обеспечивает взаимозаменяемость насосов, значительно упрощает их эксплуатацию и создает удобства для обслуживания. Однако требования экономичности во многих случаях заставляют отказаться от применения однотипных насосов. Низкие КПД насосов обуславливаются не только тем, что режимная точка насоса находится вне зоны оптимальных расходов, но и несоответствием развиваемых насосами напоров требуемым напорам, так как при уменьшении расхода в сети потери напора на трение уменьшаются пропорционально квадрату расхода. Таким образом, для повышения КПД насосной станции насосы должны подбираться на разные расходы при максимальном КПД с учетом требуемых напоров, что приводит к необходимости установки разнотипных насосов.

4. Подача рабочих насосов должна быть достаточной для обеспечения максимального расхода. Число резервных насосов принимается в соответствии с классом насосной станции. Однако в любом случае целесообразно принимать не менее двух резервных агрегатов, так как при наличии одного резервного агрегата во время ремонта одного из рабочих насосов станция остается без резерва и при аварии рабочего насоса его нечем будет заменить.

Требования к надежности работы насосной станции устанавливают в зависимости от назначения водопровода. В соответствии с требуемой степенью надежности бесперебойного водоснабжения водопроводные насосные станции подразделяют на три класса:

I класс — не допускается перерыв в работе насосов, так как это может привести к значительному ущербу, повреждению технологического оборудования и нарушению сложного технологического процесса;

II класс — допускается кратковременный перерыв в работе насосов на время, необходимое для включения резервных агрегатов, что вызывает уменьшение выпуска продукции и простой технологического оборудования;



III класс — допускается перерыв в подаче воды потребителям на время ликвидации аварии, но не более одних суток; например, в населенных пунктах с числом жителей до 5000 человек, во вспомогательных цехах, на поливочные нужды и на орошение.

Насосные станции противопожарных и объединенных хозяйственно-противопожарных или производственно-противопожарных водопроводов по надежности действия следует относить к I классу; при наличии емкостей с соответствующим противопожарным запасом воды, обеспечивающим необходимый напор, ко II классу. Число резервных агрегатов зависит от класса надежности станции и числа рабочих агрегатов (табл. 1).

Резервные насосы принимаются с характеристикой, соответствующей наибольшему насосу, установленному на насосной станции.

Определение мощности приводного двигателя. Исходными данными для определения требуемой мощности электродвигателя (кВт) являются секундная подача насоса  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) и напор  $H(\text{м})$ . Подачу и напор насоса принимают по режимной (рабочей) точке работы системы «насосы—сеть».

Мощность на валу насоса обычно указывают в паспорте насоса или в каталоге. Ее величина, взятая с запасом, соответствует подаче и напору для предельных точек рабочей части характеристики данного типа насоса.

Однако не всегда расчетные параметры подачи и напора совпадают с параметрами характеристики  $H=f(Q)$ . В этих случаях возникает необходимость в определении мощности на валу насоса и требуемой мощности приводного двигателя. В таблице 1 указано число резервных агрегатов на станции

Таблица 1 – Число резервных агрегатов на станции

Число рабочих агрегатов	Класс станции		
	I	II	III
1	2	1	1
2...3	2	1	1
4...6	2	2	1
7...9	3	3	2
10 и более	4	4	3

Мощность насоса (кВт) определяется по формуле:

$$N_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H}$$

где  $\eta_H$  — КПД насоса при работе в данном режиме.

Мощность приводного двигателя насоса принимают больше мощности, потребляемой насосом, на случай перегрузок от неучтенных условий работы:

- при непосредственном соединении вала насоса с валом электродвигателя:

$$N_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H} m$$

- при соединении приводного двигателя насоса через промежуточную передачу:

$$N_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot \eta_H \cdot \eta_{пр}} m$$

где  $m$  — коэффициент запаса мощности;  $\eta_{пр}$  — КПД передачи, принимаемый по паспорту.

В соответствии с ГОСТ 12878—67 коэффициент запаса мощности  $m$  принимают в зависимости от мощности на валу насоса  $N_H$ :

Таблица 2 – Коэффициент запаса мощности  $m$ 

$N_{\Pi}$	До 20	От 20 до 50	От 50 до 300	Свыше 300
$m$	1,25	1,2	1,15	1,1

Коэффициент запаса мощности зависит также от соотношения мощности на валу насоса при расчетных значениях подачи и напора, а также ближайшего значения мощности изготавливаемого отечественной электропромышленностью двигателя, паспортные данные которого соответствуют условиям работы насосного агрегата.

При определении мощности на валу насоса подачу насоса обычно принимают наибольшую из рассматриваемых режимов работы насосной станции. При выборе электродвигателя к насосам необходимо знать мощность, частоту вращения, напряжение в питающей сети, тип и исполнение двигателя. Каждый двигатель независимо от его типа характеризуется номинальными данными. Номинальный режим двигателя соответствует максимальному КПД и удовлетворяет установленным нормам и требованиям в отношении нагрева, коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ), электрической прочности и т.д. Поэтому при подборе электродвигателя необходимо стремиться подобрать мощность двигателя как можно ближе к номинальной.

На ряду с тиристорными регуляторами напряжения распространение в современной практике водоснабжения и водоотведения получили следующие виды регулируемого электропривода:

- частотный с преобразователем на транзисторных IGBT-модулях;
- по схеме асинхронно-вентильного каскада;
- по схеме вентильного двигателя;
- с индукторными муфтами скольжения;
- с гидромуфтами;
- с гидравлическими вариаторами.

Каждый из названных регулируемых приводов имеет свои преимущества и недостатки. Их выбор должен проводиться квалифицированными специалистами на основе изучения состава оборудования насосной установки, анализа режима ее работы во взаимосвязи с режимом работы водопроводных и канализационных сетей и других насосных установок, подающих воду в водопроводную сеть. Регулируемый электропривод должен использоваться в составе системы автоматизированного управления режимами работы насосной установки.

### 3. Выбор оборудования

#### 3.1 Выбор двигателя

Исходные данные к работе:

Таблица 3 – Исходные данные к работе

Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Напор, м	Скорость вращения вала насоса, об/мин	КПД
200	36	1450	0,74

По формуле определим необходимую расчетную мощность, для дальнейшего выбора оборудования (насос, двигатель, ПЧ)

$$P = K_3 \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000 \cdot 3600 \cdot \eta} = 1,1 \cdot \frac{1000 \cdot 9,8 \cdot 200 \cdot 36}{1000 \cdot 3600 \cdot 0,74} = 29,14 \text{ кВт}$$

$$P_H \geq P_{\text{расч}} = 29,14 \text{ кВт}$$

Из каталога выбираем двигатель RA225S4 имеющий следующие параметры:

Таблица 4 – Параметры двигателя

Р <sub>ном</sub> , кВт	n <sub>ном</sub> , об/мин	КПД	Кэф. М-ти	И <sub>ном</sub> , А	М <sub>ном</sub> , Нм	М <sub>пуск</sub> /М <sub>ном</sub>	И <sub>пуск</sub> /И <sub>ном</sub>	М <sub>макс</sub> /М <sub>ном</sub>	J, кг·м <sup>2</sup>
37	1465	0,92	0,87	70	241	2,2	7,5	3,5	0,194

Технические данные двигателей основного исполнения , степень защиты IP 54, класс нагревостойкости изоляции «F», 2p =4;

### 3.2 Выбор насосного агрегата

Выбираем насос, Д200-36, по номинальной мощности электродвигателя RA225S4. Центробежный насос двухстороннего входа Д200-36 имеет следующие параметры:

Таблица 5 – параметры насоса

Тип насоса	Подача, м <sup>3</sup> /ч,	Напор, м	Макс. потребляемая мощность насоса, кВт	Частота вращения, (об/мин)
Д200-36	200	36	37	1450



Рисунок 13 – Насос

В центробежных насосах движение жидкости происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращении жидкости лопатками рабочего колеса. Рабочее колесо с лопатками, насаженное на вал, вращается внутри корпуса. Жидкость, поступающая к центру колеса по всасывающему патрубку, вращается вместе с колесом, отбрасывается

центробежной силой к периферии и выходит через нагнетательный патрубок (рис.14).

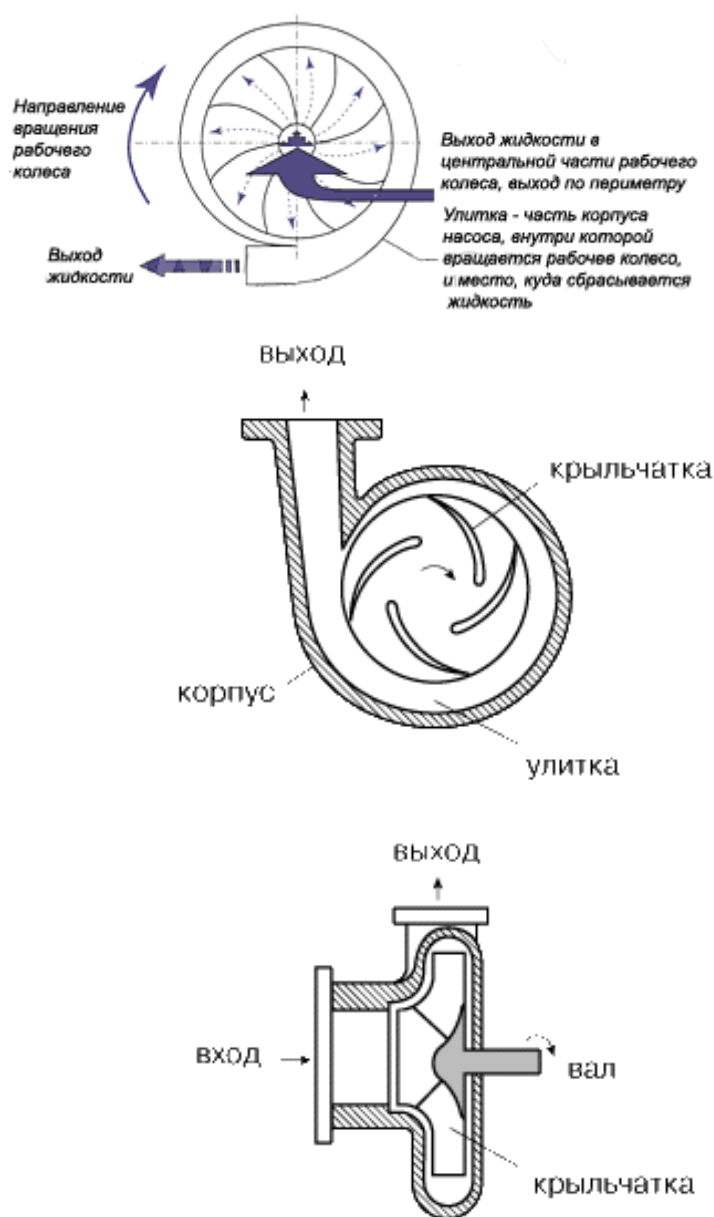


Рисунок 14 – Движение жидкости в центробежных насосах.

Если для обеспечения необходимой подачи или создании потребного напора одного насоса недостаточно, применяют параллельное или последовательное соединение насосов.

Центробежные насосы имеют следующие преимущества: малые габариты; относительно небольшая стоимость; отсутствие клапанов и деталей: с возвратно-поступательным движением; возможность прямого присоединения к быстроходным двигателям; плавное изменение подачи

насоса с изменением гидравлического сопротивления трубы; возможность пуска насоса при закрытой задвижке на нагнетательной линии без угрозы порыва задвижки или трубопровода; возможность перекачки нефти; содержащих механические примеси; простота автоматизации насосных станций; оборудованных центробежными насосами.

### 3.3 Выбор преобразователя частоты

С точки зрения энергетики основным параметром электропривода является его мощность. Поэтому при выборе преобразователя частоты в первую очередь необходимо определить требования к его нагрузочной способности. Вторым немаловажным параметром преобразователя являются требования к напряжению питающей сети. Как правило, преобразователи питаются от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В, разброс +10% / -15%, что вполне соответствует требованиям российских стандартов к качеству электроснабжения.

В настоящее время существует большое количество различных преобразователей частоты. Ведущие позиции среди них занимают преобразователи таких фирм, как “ВЕСПЕР”, ” Siemens”, “ABB”, “Danfoss”, “Omron”, “Mitsubishi”, “Schneider Electric”, “Delta Electronics”.

Выбираем ПЧ при условии:

$$I_{Н\text{ ПЧ}} \geq 1,25 I_{Н\text{ ДВ}}$$

$$P_{Н\text{ ПЧ}} \geq 1,25 P_{Н\text{ ДВ}}$$

Насосный преобразователь частоты EI-P7012



Рисунок 15 – Преобразователь частоты EI-P7012

Модель нового поколения преобразователей частоты насосной серии. Используется для управления приводами с переменной нагрузкой насосного типа. Новую модель выгодно отличают расширенные функциональные возможности, меньшие массогабаритные характеристики, увеличенный диапазон мощностей.

- Диапазон мощностей 7,5 кВт - 370 кВт.
- Возможность управления группой электродвигателей от одного преобразователя.
- Встроенный ПИД-регулятор. Управление по вольт-частотной характеристике U/F.
- Аналоговые и цифровые входы/выходы для регулирования и дистанционного управления.
- Управление и диагностика по линии RS-485/RS-232.
- Питание 380 В, 50 Гц .

Специализированная серия преобразователей разработана для управления механизмами, предназначенными для транспортировки жидкостей и газов. Эти механизмы подразделяются на три группы:

насосы;  
вентиляторы;  
компрессоры.

Преобразователи серии EI-P7012 ориентированы на наиболее распространенную в настоящее время группу насосов, вентиляторов и компрессоров центробежного типа, которые имеют так называемую



вентиляторную нагрузку. Отличительными особенностями преобразователей этой серии, которые обусловлены типом нагрузки, являются:

    скалярное управление с фиксированным соотношением между напряжением питания и частотой питающего напряжения ( $U/f$ );

    отсутствие встроенных и дополнительных тормозных устройств;

    пониженная перегрузочная способность по моменту в пределах 15% - 20%.

Некоторое упрощение функций преобразователя позволило снизить стоимость, упростить обслуживание и предложить его для массового внедрения на многих объектах в различных отраслях.

Преобразователи серии EI-P7012 рекомендуется использовать для регулирования подачи и поддержания заданного напора жидкости, давления или разряжения газа, температуры газа и т.п. на нефте- и газоперекачивающих станциях, насосных водопроводных станциях, в котельных, на станциях водоочистки, в центральных тепловых пунктах, в установках главного проветривания шахт и т.п. Применение EI-P7012 позволяет существенно уменьшить потребление электроэнергии и энергоресурсов, продлить срок службы оборудования, упростить техническое обслуживание, снизить число аварийных ситуаций.

При решении перечисленных задач преобразователь может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. В обоих режимах предусмотрено местное или дистанционное управление.

В ручном режиме управление осуществляется оператором с местного или дистанционного пульта без обратной связи. Для удобства пользователя в преобразователе имеется возможность подключения внешнего задающего аналогового устройства – потенциометра. Наблюдение за параметрами рабочего процесса (подача, напор, давление, разряжение ) производится оператором по измерительным приборам. Точность поддержания скорости в ручном режиме составляет  $\pm 2\% - 3\%$ . Диапазон управления скоростью равен 1: 20.

Предпочтительнее с точки зрения качества управления параметрами рабочего процесса использовать автоматический режим с обратной связью по регулируемому параметру. Для измерения параметров процесса можно использовать все известные датчики физических величин аналогового типа. Выходной токовый сигнал датчика может быть от 4 мА до 20 мА, сигнал по напряжению - от 0 В до 10 В. При совместной договоренности преобразователи могут поставляться компанией в комплекте с датчиками.

В автоматическом режиме с обратной связью в преобразователе реализуется ПИД-закон регулирования. Для оперативной настройки параметров регулятора под требуемый технологический процесс имеется возможность управлять коэффициентами обратной связи. Использование ПИД-регулятора позволяет поддерживать заданные параметры практически без ошибки. При выборе ПЧ для мощных вентиляторов, дымососов, компрессоров с большими инерционными массами необходимо обратить внимание на возможность ограничения пусковых токов. Ограничение пусковых токов требуется также для исключения гидроударов в трубопроводах. В преобразователе для исключения ударных нагрузок на двигатель и механическую часть привода имеется функция плавного пуска. Вы можете выставить время разгона или торможения электродвигателя независимо друг от друга в пределах от 0,1 с до 3600 с.

### **3.4 Выбор и обоснование датчика давления**

Устройства получения информации о состоянии технологического процесса предназначены для сбора и преобразования информации без изменения ее содержания о контролируемых и управляемых параметрах ТП. Входом устройств являются естественные или унифицированные сигналы, выходом – соответствующие значения унифицированных сигналов.

К устройствам для получения информации о состоянии процесса, образующим канал сбора и преобразования информации, относят чувствительные элементы или собственно датчики.

Датчики физических величин воспринимают контролируемый параметр и преобразуют его в величину, удобную для передачи по каналам связи или дальнейшего преобразования.

Основными характеристиками измерительных устройств для получения информации о состоянии ТП являются: входная величина, воспринимаемая и преобразуемая датчиком; выходная величина, используемая для передачи информации; статическая и динамическая характеристики датчика; порог чувствительности; основная и дополнительные погрешности.

В данном ТП в качестве измерительного устройства используется датчик давления подачи воды (ДД).

Входная величина  $Q$ , поступающая на вход датчика ДД, относится к классу входных величин датчика, характеризующих протекание процесса. Выходная величина, используемая для передачи информации, моделируется по амплитуде. Динамическая характеристика датчика определяет поведение датчика при изменении входной величины и определяется внутренней структурой датчика и его элементов.

Точность измерений давления воды характеризуют следующие факторы:

- порог чувствительности датчика – минимальное изменение входной величины, вызывающее изменение выходного сигнала;
- основная погрешность датчика – максимальная разность между получаемой в нормальных эксплуатационных условиях величиной выходного сигнала и его номинальным значением, определяемая по статической характеристике для данной входной величины;
- дополнительные погрешности датчика – погрешности, вызываемые изменениями внешних условий по сравнению с нормальными условиями (температурная погрешность и др.).

Датчики, обеспечивающие управление технологическими переменными и управляющими воздействиями:

В комплект поставки преобразователя частоты входит датчик давления ОТ-1 (МН-2)

Таблица 6 – Параметры датчика давления ОТ-1 (МН-2)

Название	ОТ-1 (МН-2)
Тип	Тензорезистивный
Диапазоны давления	0...6, 0...10, 0...16, 0...25 бар
Погрешность	1 %
Выходной сигнал	4-20 мА (двухпроводное подключение)
Питание	10...30 В постоянного тока
Присоединение	G1/4
T <sub>раб</sub> измеряемой среды	-40 °С...+125 °С
T <sub>раб</sub> окружающей среды	-40 °С...+100 °С
Защита от ударных нагрузок	500g (механический удар)
Защита от вибрации	20g (вибрация в условиях резонанса)
Материалы, контактирующие с измеряемой средой	Нержавеющая сталь с добавками CrNi
Пылевлагозащита	IP67
Масса	70 г



Рисунок 16 – Датчик давления ОТ-1 (МН-2)

### 3.5 Выбор контакторов и автоматов защиты

По номинальному току и мощности были выбраны два контактора фирмы Danfoss серии CI 73



Рисунок 17 – Контактор CI 73

Таблица 7 – Параметры контактора CI 73

Характеристики	Величина
Тип	CI 73
Вес [кг]	1.460 [кг]
АС-1 нагрузочный, $I_{th}$ , открытый	100,0 А
АС-1 нагрузочный, $I_{the}$ , закрытый	100,0 А
АС-3 нагрузочный, $I_e$	72,0 А
АС-3 силовой при 380-690 В	37,0 kW
Напряжение катушки при частоте 50 Гц	24 V
Напряжение катушки при частоте 60 Гц	24 V
EAN	5702423111183
Главные контакты	3
Максимальное количество навесных вспомогательных контактов	8

Также были выбраны автоматические выключатели, которые предназначены для защиты проводов, кабелей, электрооборудования от короткого замыкания и перегрузок. Для этого было выполнено следующее:

1) Пусковой ток

$$I_{\text{пуск}} = 5 I_{\text{ном}} = 5 \cdot 72 = 360 \text{ А}$$

2) Кратковременный ток

$$I_{\text{кр}} = 2,5 \cdot I_{\text{пуск}} = 2,5 \cdot 360 = 900 \text{ А}$$

3) Ток электромагнитного расцепителя должен быть больше  $I_{\text{кр}}$

$$I_{\text{эм}} \geq I_{\text{кр}} ; \quad 80 \cdot 12 = 960 \geq 900$$

4) Ток теплового расцепителя должен быть больше  $I_{\text{ном}}$

$$I_{\text{т.р.}} \geq I_{\text{ном}}; \quad 80 \geq 72$$

Для защиты выбираем автоматический выключатель ВА 57-35 80А (2 шт) и ВА 57-35 100А



Рисунок 18 – Автомат защиты ВА 57-35

Автоматический выключатель ВА 57-35 (16...100А) - трехполюсный, с тепловым расцепителем токов перегрузки и электромагнитным расцепителем токов короткого замыкания, применяется для отключения тока при аварийных ситуациях (перегрузках, коротких замыканиях и недопустимых снижениях напряжения), а также для нечастых (до 30 раз в сутки) включений и отключений электроцепей.

Тип автомата ВА 57-35

Номинальный ток 16 А ... 100 А

Климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69 - УХЛ3

Нормативно техническая документация: ТУ 16-93 ИГПН.641452.068

Износостойкость выключателя: общее количество циклов 16000;  
количество циклов под нагрузкой 10000

Номинальное переменное напряжение сети - 50 Гц до ~660 В

Номинальное постоянное напряжение 220 В

#### **4. Расчет параметров и характеристик АД**

##### **4.1 Определение параметров Т-образной схемы замещения**

Определить параметры Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя RA225S4 со следующими каталожными данными:

Номинальная мощность двигателя:  $P_n = 37$  кВт

Номинальное фазное напряжение:  $U_{н1} = 220 \text{ В}$

Номинальное напряжение сети:  $U_{фн} = 380 \text{ В}$

Номинальная частота вращения:  $n_n = 1465 \text{ об/мин}$

КПД в режиме номинальной мощности:  $\eta_n = 0,92 \text{ о. е.}$

Коэффициент мощности в режиме номинальной мощности:  $\cos \varphi = 0,87 \text{ о. е.}$

Кратность пускового тока:  $k_i = 7,5 \text{ о. е}$

Кратность пускового момента:  $k_{п} = 2,2 \text{ о. е}$

Кратность максимального момента:  $k_{max} = 3,5 \text{ о. е}$

Коэффициент загрузки двигателя:  $p_{ж} = 0,75 \text{ о. е}$

Число пар полюсов:  $p = 2$

Для расчета электромеханических и механических характеристик асинхронного двигателя необходимо воспользоваться его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения:

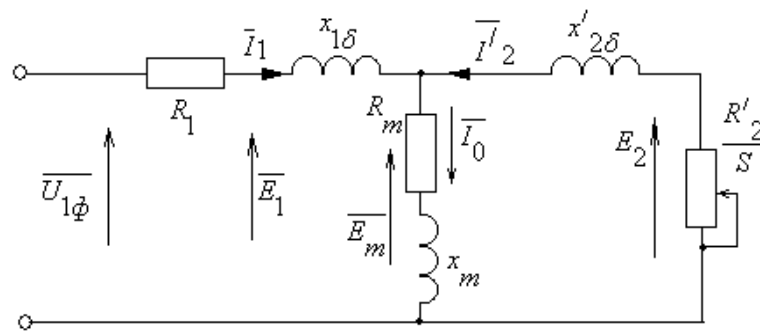


Рисунок 19 – Схема замещения асинхронного двигателя

$U_{1\phi}$  – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя;

$I_1$  – ток обмотки статора;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора;

$X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

$I_2'$  – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора;

$R_2'$  – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

$X_{2\sigma}'$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора;

$I_0$  – ток холостого хода (намагничивания);

$X_m$  - индуктивное сопротивление контура намагничивания

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\bar{U}_{1\Phi} - \bar{E}_m - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X_2' \cdot \bar{I}_2 + R_2' \cdot \bar{I}_2 / s = 0$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2' - \bar{I}_0 = 0$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рисунке 20:

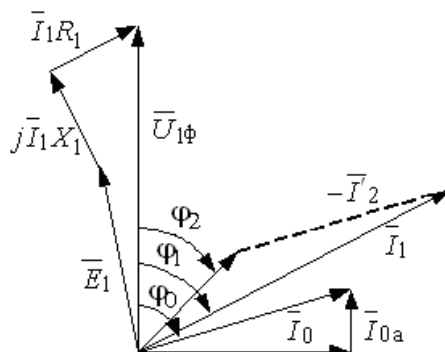


Рисунок 20 – Векторная диаграмма асинхронной машины

4.1.1 Найдем синхронную частоту вращения и номинальное скольжение:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1465}{1500} = 0,023 \text{ о.е.}$$



4.1.2 Найдем ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_{\text{ж}} \cdot I_{1\text{н}} \cdot \frac{1 - S_{\text{н}}}{1 - p_{\text{ж}} \cdot S_{\text{н}}}\right)^2}{1 - \left(p_{\text{ж}} \cdot \frac{1 - S_{\text{н}}}{1 - p_{\text{ж}} \cdot S_{\text{н}}}\right)^2}}, \text{ где}$$

$$I_{11} = \frac{p_{\text{ж}} \cdot P_{\text{н}}}{3 \cdot U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{рж}} \cdot \eta_{\text{нрж}}} = \frac{0,75 \cdot 37000}{3 \cdot 220 \cdot 0,861 \cdot 0,92} = 53 \text{ А} - \text{ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке, где

$$\eta_{\text{нрж}} = \eta_{\text{н}} = 0,92 \text{ о.е.} - \text{КПД при частичной нагрузке,}$$

$$\cos \varphi_{\text{рж}} = \cos \varphi \cdot \left( \frac{\cos \varphi_{0,75}}{\cos \varphi} \right) = 0,87 \cdot 0,98 = 0,85 \text{ о.е.} - \text{коэффициент}$$

мощности при частичной нагрузке, где

$\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_{\text{н}} = 0,98$  – относительный коэффициент мощности при частичной нагрузке (из графика на рис. 21),

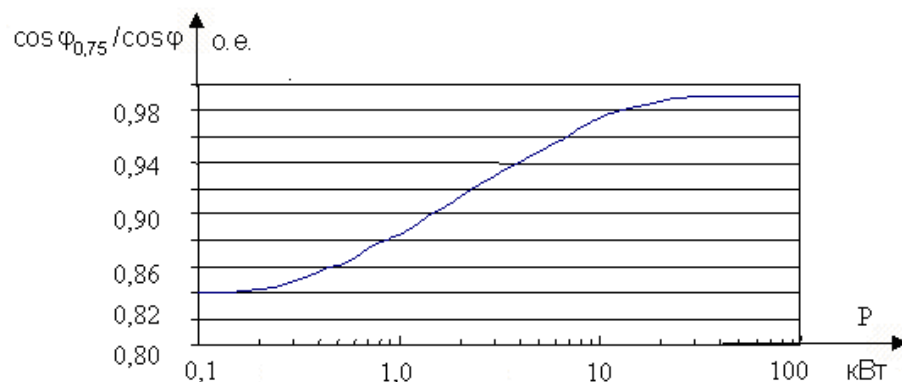


Рисунок 21 – Зависимость  $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_{\text{н}}$  от мощности асинхронного двигателя

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{3 U_{1\text{н}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{37000}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,92} = 70 \text{ А} - \text{номинальный ток}$$

статора двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_{\text{ж}} \cdot I_{1\text{H}} \cdot \frac{1 - S_{\text{H}}}{1 - p_{\text{ж}} \cdot S_{\text{H}}})^2}{1 - (p_{\text{ж}} \cdot \frac{1 - S_{\text{H}}}{1 - p_{\text{ж}} \cdot S_{\text{H}}})^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{54,3^2 - (0,75 \cdot 71,7 \cdot \frac{1 - 0,02}{1 - 0,75 \cdot 0,02})^2}{1 - (0,75 \cdot \frac{1 - 0,02}{1 - 0,75 \cdot 0,02})^2}} = 14,09 \text{ A}$$

4.1.3 Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем  $\beta = 1$

$$S_{\text{к}} = S_{\text{H}} \cdot \frac{k_{\text{max}} + \sqrt{k_{\text{max}}^2 - [1 - 2 \cdot S_{\text{H}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot S_{\text{H}} \cdot \beta \cdot (k_{\text{max}} - 1)} =$$

$$0,023 \cdot \frac{3,5 + \sqrt{3,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (3,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,023 \cdot 1 \cdot (3,5 - 1)} = 0,179 \text{ о.е.}$$

4.1.4 Найдем значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + (\frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{H}}}) = 1 + (\frac{14,09}{2 \cdot 7,5 \cdot 70}) = 1,013 \text{ о.е.};$$

$$A_1 = m \cdot U_{1\text{H}}^2 \cdot \frac{1 - S_{\text{H}}}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{max}} \cdot P_{\text{H}}} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,023}{2 \cdot 1,013 \cdot 3,5 \cdot 37000} = 0,54 \text{ о.е.}$$

4.1.5 Теперь можно определить активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{S_{\text{к}}}) \cdot C_1} = \frac{0,54}{(1 + \frac{1}{0,179}) \cdot 1,013} = 0,081 \text{ Ом}$$

4.1.6 Активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,013 \cdot 0,081 \cdot 1 = 0,082 \text{ Ом}$$

4.1.7 Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $x_{\text{кн}}$ :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{S_{\text{к}}}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,179}\right)^2 - 1^2} = 5,51 \text{ о.е.}$$

4.1.8 Найдём значение индуктивного сопротивления короткого замыкания:

$$x_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 5,51 \cdot 1,013 \cdot 0,081 = 0,451 \text{ Ом}$$

4.1.9 Найдём индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x_{2\text{н}}' = 0,58 \cdot \frac{x_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{0,451}{1,013} = 0,258 \text{ Ом}$$

4.1.10 Найдём индуктивное сопротивление статорной обмотки:

$$x_{1\text{н}} = 0,42 \cdot x_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 0,451 = 0,19 \text{ Ом}$$

4.1.11 По найденным значениям  $C_1, R_2'$  и  $x_{\text{кн}}$  определим критическое скольжение:

$$S_{\text{к1}} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,013 \cdot 0,081}{\sqrt{0,082^2 + 0,451^2}} = 0,179 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения  $S_{\text{к1}}$  и  $S_{\text{к}}$  равны.

4.1.12 Для того чтобы найти ЭДС ветви намагничивания  $E_1$  найдём  $\sin \varphi$ :

$$\varphi = \arccos(\cos \varphi) = \arccos(0,87) = 0,516$$

$$\sin \varphi = 0,493$$

4.1.13 Найдём ЭДС ветви намагничивания  $E_1$ , наведенную потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi - x_{1H} \cdot I_{1H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,87 - 0,082 \cdot 70)^2 + (220 \cdot 0,493 - 0,19 \cdot 70)^2} = 208,64 \text{ В}$$

4.1.14 Тогда индуктивное сопротивление намагничивания:

$$x_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{208,64}{14,09} = 14,803 \text{ Ом}$$

## 4.2 Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик АД

4.2.1. Найдем синхронную угловую скорость:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

4.2.2. Рассчитаем и построим естественную электромеханическую характеристику:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + I_2'(\omega)^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(\omega) \cdot \sin \phi_2}, \text{ где}$$

$$\sin \phi_2 = \frac{x_{KH}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0})^2 + x_{KH}^2}}$$

$I_2'(\omega)$  - значение приведенного тока ротора от скольжения;

$$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{\omega - \omega_0})^2 + (x_{1H} + x_{2H}')^2}}$$

По вышеприведенным формулам рассчитывается естественная электромеханическая характеристика, приведенная на рисунке 22:

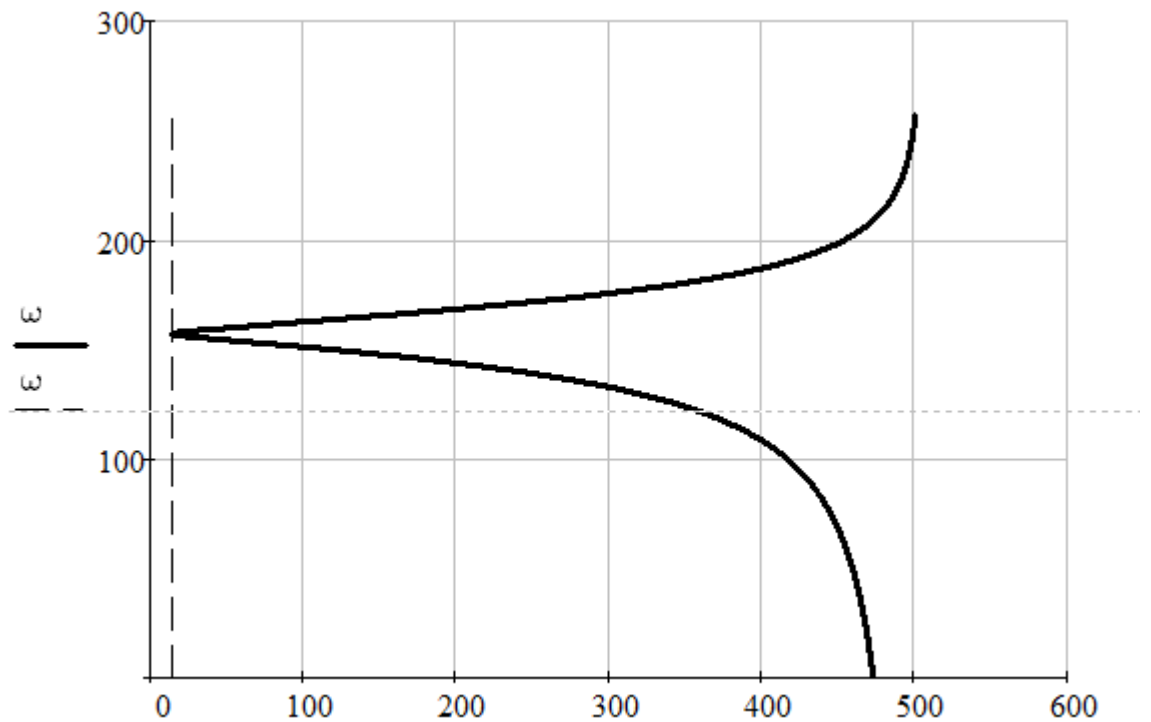


Рисунок 22 – Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя.

4.2.3. Рассчитаем и построим естественную механическую характеристику по следующей формуле:

$$M(\omega) = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \cdot [(R_1 + \frac{R'_2}{\omega - \omega_0})^2 + x_{KH}^2]} \cdot \omega_0$$

4.2.4. Рассчитаем контрольные точки механической характеристики по паспортным данным:

Номинальная скорость:

$$\omega_H = \omega_0 \cdot (1 - S_H) = 157,08 \cdot (1 - 0,023) = 153,46 \text{ рад/с};$$

$$\text{Момент номинальный: } M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{37000}{153,94} = 241,177 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$\text{Момент критический: } M_{\text{кр}} = M_{\text{ном}} \cdot k_{\text{макс}} = 241,177 \cdot 3,5 = 844,119 \text{ Нм};$$

$$\text{Момент пусковой: } M_{\text{п}} = 2 \cdot M_{\text{кр}} \cdot S_{K1} = 2 \cdot 844,119 \cdot 0,179 = 302,19 \text{ Нм}.$$

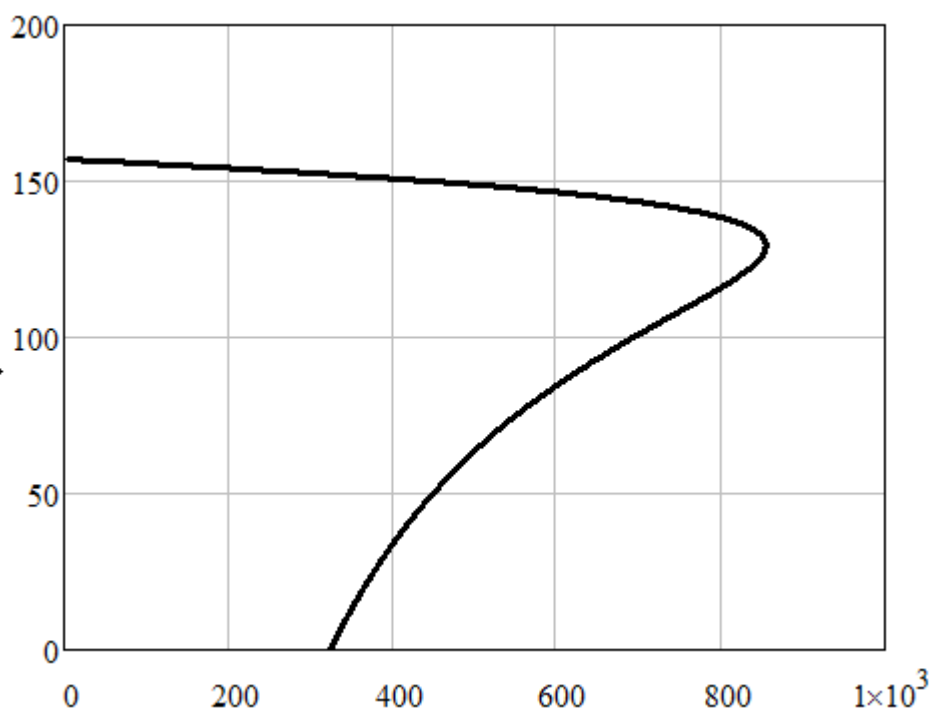


Рисунок 23 – Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя

## 5. Система автоматического управления электропривода

### 5.1 Скалярное управление. Закон Костенко

До середины 70-х годов прошлого столетия скалярное частотное управление было основным видом управления, используемым в автоматизированном асинхронном электроприводе. Но и в настоящее время, несмотря на конкуренцию с векторными способами управления, оно довольно широко распространено, т.к. позволяет решать многие технические задачи массового электропривода проще и эффективнее. Это относится в первую очередь к приводам с малым диапазоном регулирования и низкими требованиями к динамике. Термин скалярное управление связан с тем, что оно базируется на изменении скалярных величин, определяющих электромагнитный момент АД (частоты, напряжения, токов и магнитных потоков). Физической основой скалярных способов управления являются

электромагнитные процессы в АД, возникающие при изменении этих величин.

Для обеспечения работоспособности привода при скалярном частотном управлении необходимо задать функциональную связь между каналами управления напряжением и частотой питания статора, называемую законом управления.

В 1925 академик Михаил Полиевктович Костенко сформулировал общий закон, обеспечивающий оптимальные условия работы двигателя в следующей форме: чтобы обеспечить оптимальный режим работы АД при всех значениях частоты и нагрузки, необходимо относительное напряжение двигателя изменять пропорционально произведению относительной частоты на корень квадратный из относительного момента двигателя.

Этот закон частотного управления можно записать уравнением

$$\frac{U_1}{U_{1H}} = \frac{f_1}{f_{1H}} \sqrt{\frac{M_C}{M_H}}$$

Закон Костенко можно получить из следующих элементарных соображений. Если предположить, что коэффициент перегрузочной способности при регулировании остается постоянным, то критический момент, зависящий от квадрата величины магнитного потока, также должен оставаться постоянным и отношение моментов при двух различных частотах будет равно.

Условия работы АД в рассматриваемом режиме М.П. Костенко формулирует так: «Если сконструировать асинхронный двигатель для частоты  $f_{1H}$  момента  $M_H$  и напряжения на зажимах  $U_{1H}$  и изменять затем при новом значении момента  $M$  напряжение  $U_1$  и частоту  $f_1$  таким образом, чтобы удовлетворялось соотношение, то двигатель будет работать при практически неизменных  $\cos \varphi$ , коэффициенте перегружаемости и абсолютном скольжении, а его к.п.д. будет зависеть только от изменения

частоты  $\frac{f_1}{f_{1H}}$  и практически не будет зависеть от изменения момента на валу

$\frac{M_C}{M_H}$ , если насыщение магнитной цепи двигателя не слишком велико».

Закон регулирования М. П. Костенко обычно рассматривают в применении к вентиляторной нагрузке, т.е. к таким видам момента статического сопротивления, которые зависят от скорости или с точностью до скольжения - от частоты:

$$\omega = \omega_{1H}(\alpha - \beta) \approx \omega_{1H\alpha} = \frac{\pi}{p} f_1$$

Подставляя в формулу соответствующую зависимость статического момента

$$M_{cm} = M_H \left( \frac{\omega}{\omega_H} \right)^k \approx M_H \left( \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^k$$

получим в частных случаях формулы:

При постоянном моменте  $\frac{f_1}{f_{1H}} = \frac{U_1}{U_{1H}};$

при постоянной мощности  $\frac{U_1}{U_{1H}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_{1H}}};$

при простой вентиляторной нагрузке  $\frac{U_1}{U_{1H}} = \left( \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2.$

Эти законы являются фактическим стандартом, заложенным во все современные преобразователи частоты широкого применения. Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов при законах управления представлены на рисунке 24.



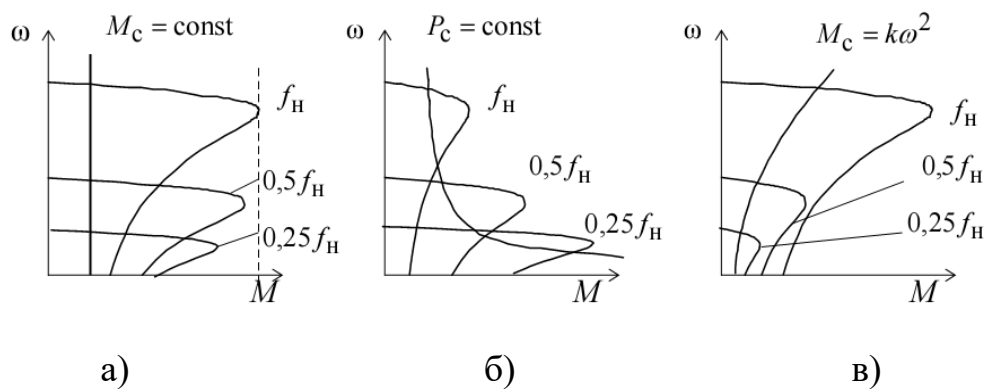


Рисунок 24 – Механические характеристики производственных механизмов и электроприводов при законах управления:

$$\text{а) } \frac{U_1}{f_1} = \text{const} ; \text{б) } \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const} ; \text{в) } \frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$$

Закон регулирования М. П. Костенко можно рассматривать по-разному в зависимости от способа его реализации. В первоначальном понимании, в котором его часто рассматривают и теперь, он относится к управлению по разомкнутому циклу и говорит о том, как надо изменить напряжение, если двигатель будет работать не при номинальной частоте, а при новом, пониженном ее значении. При этом, особо отмечает, что при выяснении нового значения напряжения нужно учитывать свойства нагрузки. Если она с уменьшением частоты также уменьшается из-за сопутствующего почти пропорционально частоте уменьшения скорости вращения, то нет смысла сохранять поток двигателя на том же уровне. Его можно уменьшить настолько, чтобы только сохранить старый номинальный коэффициент статической перегружаемости, т.е. запас статической устойчивости.

Уменьшение потока при том же запасе устойчивости позволит уменьшить потери в стали двигателя.

Важно, что после того, как мы перешли на новую частоту при разомкнутом управлении, напряжение остаётся постоянным, никак не зависит от нагрузки, и формула больше не действует до следующего перехода на новую частоту и напряжение, значения которых снова следует устанавливать по этой формуле.

Характерной и принципиальной особенностью этого закона в обобщённом смысле является регулирование напряжения и, следовательно, потока двигателя непрерывно, соответственно изменениям момента нагрузки на валу двигателя.

## 5.2 Расчёт и построение механических и электромеханических характеристик АД для закона

Расчет характеристик производим для частот  $f_1=50;30;20;15$  Гц.

При законе регулирования  $Z_p = \frac{U_{1H}}{f^2} = \frac{220}{50^2} = 0,088$ .

Найдем относительные значения частот питающего напряжения:

$$\text{при } f_{1H1} = 50 \text{ Гц} \quad f_{1*1} = \frac{f_{1H1}}{f_{1H1}} = \frac{50}{50} = 1;$$

$$\text{при } f_{1H2} = 30 \text{ Гц} \quad f_{1*2} = \frac{f_{1H2}}{f_{1H1}} = \frac{30}{50} = 0,6;$$

$$\text{при } f_{1H3} = 20 \text{ Гц} \quad f_{1*3} = \frac{f_{1H3}}{f_{1H1}} = \frac{20}{50} = 0,4;$$

$$\text{при } f_{1H4} = 15 \text{ Гц} \quad f_{1*4} = \frac{f_{1H4}}{f_{1H1}} = \frac{15}{50} = 0,3.$$

Найдем фазное напряжение обмотки статора асинхронного двигателя:

$$U_{1H1} = Z_p \cdot f_{1H1}^2 = 0,088 \cdot 50^2 = 220 \text{ В};$$

$$U_{1H2} = Z_p \cdot f_{1H2}^2 = 0,088 \cdot 30^2 = 79,2 \text{ В};$$

$$U_{1H3} = Z_p \cdot f_{1H3}^2 = 0,088 \cdot 20^2 = 35,2 \text{ В};$$

$$U_{1H4} = Z_p \cdot f_{1H4}^2 = 0,088 \cdot 15^2 = 19,8 \text{ В}.$$

В соответствии с представленными частотами питающего напряжения произведем расчет значений скорости идеального холостого хода:

$$\omega_{01} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{02} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H2}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{2} = 94,25 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{03} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H3}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20}{2} = 62,83 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{04} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H1}}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15}{2} = 47,12 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Определим токи холостого хода при данных частотах регулирования:

$$I_{01} = \frac{U_{1H1}}{x_{\mu H}} = \frac{220}{14,803} = 14,862 \text{ А};$$

$$I_{02} = \frac{U_{1H2}}{x_{\mu H} \cdot f_{1*2}} = \frac{79,2}{14,58 \cdot 0,6} = 9,05 \text{ А};$$

$$I_{03} = \frac{U_{1H3}}{x_{\mu H} \cdot f_{1*3}} = \frac{35,2}{14,58 \cdot 0,4} = 6,06 \text{ А};$$

$$I_{04} = \frac{U_{1H4}}{x_{\mu H} \cdot f_{1*4}} = \frac{19,8}{14,58 \cdot 0,3} = 4,52 \text{ А}.$$

Строим электрохимические характеристики  $I_2(\omega)$  для выбранных частот по выражениям:

$$I_2'(s, f) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)}\right)^2}},$$

где  $\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s)$ .

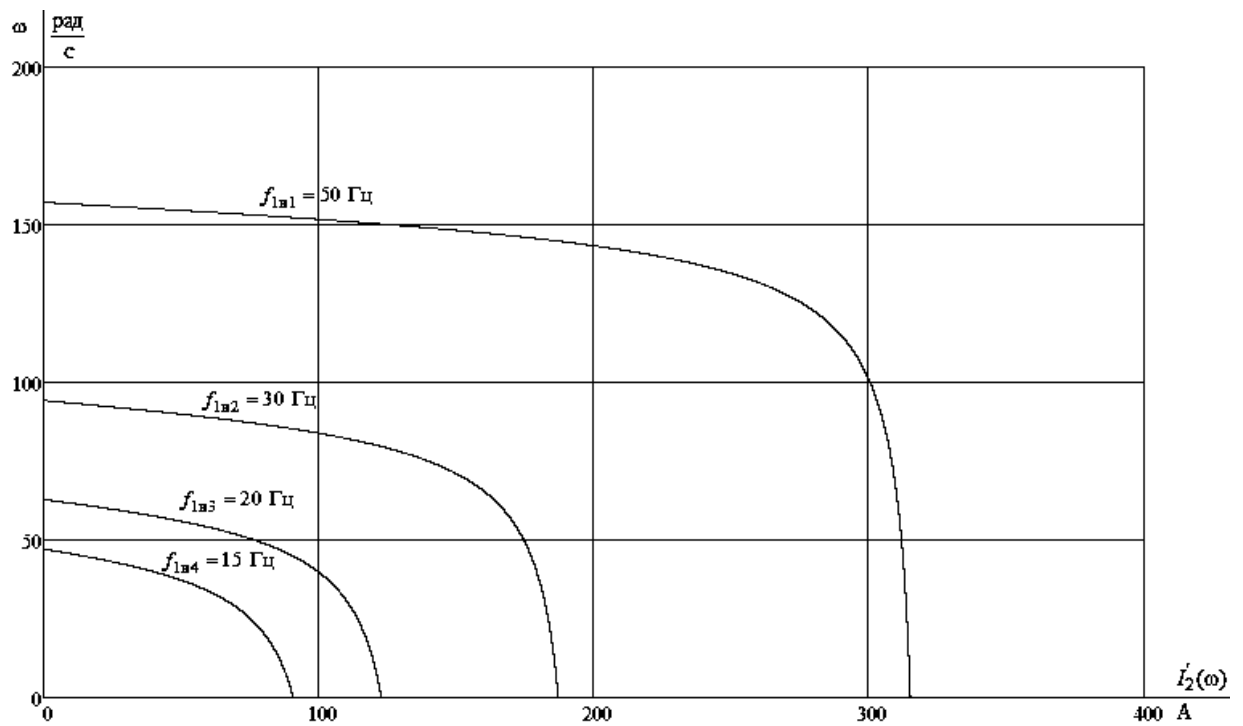


Рисунок 25 – Искусственные электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$

для закона управления  $\frac{U_1}{f_1^2} = const$

Также строим электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  для выбранных частот по выражениям

$$I_1(s, f) = \sqrt{\left(I_0(f)\right)^2 + \left(I_2'(s, f)\right)^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f) \cdot \sin \varphi_2(s, f)},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

$$\text{где } \sin \varphi_2(s, f) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}};$$

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} - \text{ток холостого хода асинхронного двигателя в}$$

зависимости от частоты.

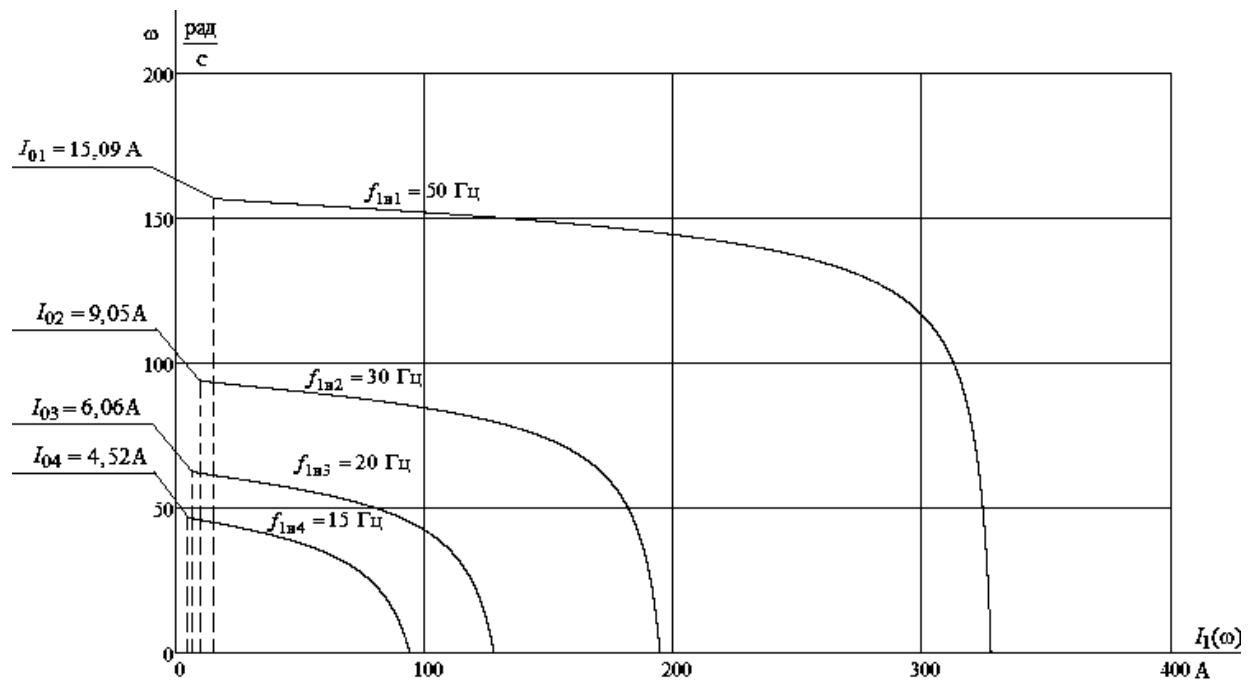


Рисунок 26 – Искусственные электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  для

$$\text{закона управления } \frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$$

Механические характеристики асинхронного двигателя  $M(\omega)$  (рис.27) рассчитываем для выбранных по выражениям

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[ X_{\text{кн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left( R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\text{мн}} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s).$$

Критические момент и скольжение можно определить по выражениям

$$M_K(f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[ R_1 + \sqrt{\left( R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{мн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right)} \right]},$$

$$s_K(f) = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\text{мн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}},$$

$$\omega_k(f) = \omega(s_k(f), f).$$

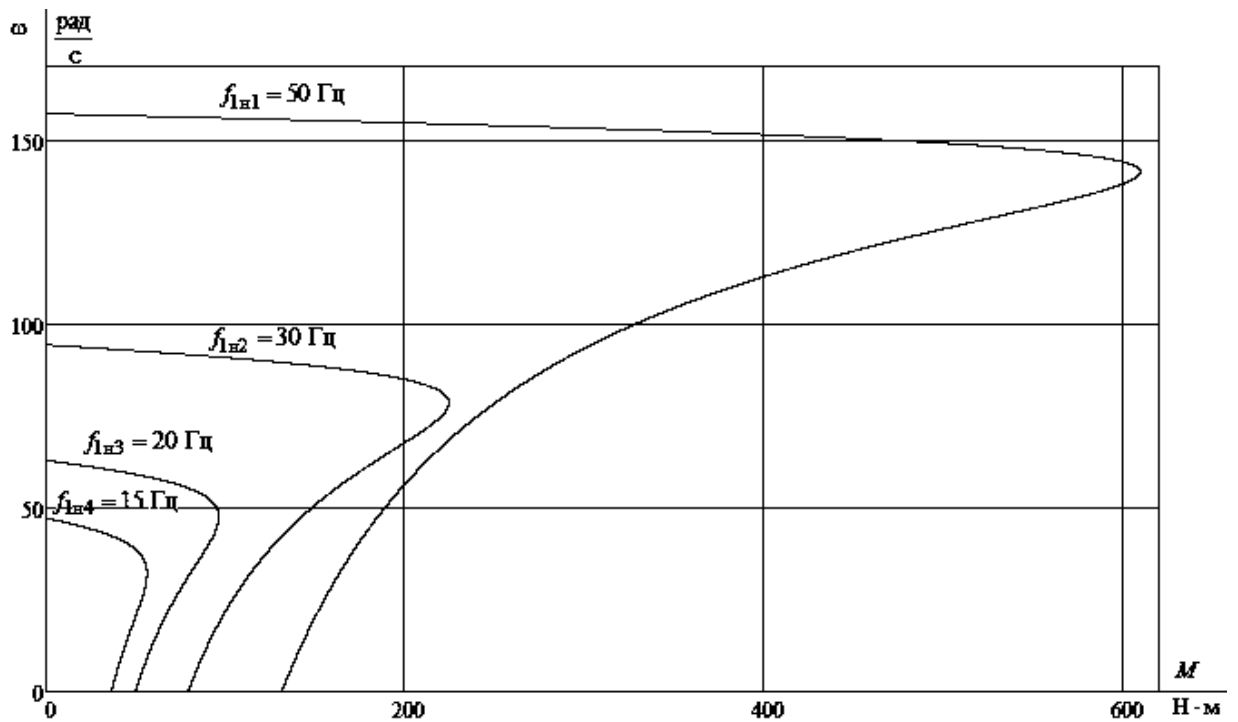


Рисунок 27 – Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$

$$\text{для закона управления } \frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$$

Электромеханические характеристики:

При уменьшении частоты происходит уменьшение синхронной скорости, т.к.

$$1. \omega_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \cong f \quad - \quad \text{при уменьшении частоты синхронная скорость}$$

снижается.

$$2. I'_{2\text{кз}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + X_{\text{кн}}^2}} \cong \frac{U_1}{f} \cong f \quad - \quad \text{ток короткого замыкания обратно}$$

квадратному корню из частоты.

Механические характеристики:

$$1. \omega_0 = \frac{60 \cdot f}{p} \cong f \quad - \quad \text{при уменьшении частоты синхронная скорость}$$

снижается.

$$2. s_K = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} \cong \frac{1}{f}; M_K = \frac{3 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2} \right]} \cong \frac{U_1^2}{f^2} \cong f^2.$$

Критические момент и скольжение обратно пропорциональны частоте.

3.  $M_{\Pi} = 2 \cdot M_K \cdot s_K \cong f$  - пусковой момент обратно пропорционален квадрату частоты.

### 5.3 Расчет потерь в асинхронном двигателе при работе на искусственных характеристиках

Определим потери в роторе при работе с вентиляторной нагрузкой. Зададим функцию нагрузки. Примем момент трения  $M_0 = 1,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Примем, что при частоте  $f_{1H} = 50$  Гц нагрузка проходит через точку номинального режима двигателя. Рассчитаем коэффициент  $k$ .

$$k = \frac{M_H - M_0}{\omega_H^2} = \frac{240,36 - 1,2}{153,94^2} = 0,01009$$

Вентиляторная нагрузка описывается функцией:

$$M_c = M_0 + k \cdot \omega^2 = 1,2 + 0,01009 \cdot \omega^2$$

Построим механические характеристики двигателя и нагрузки.

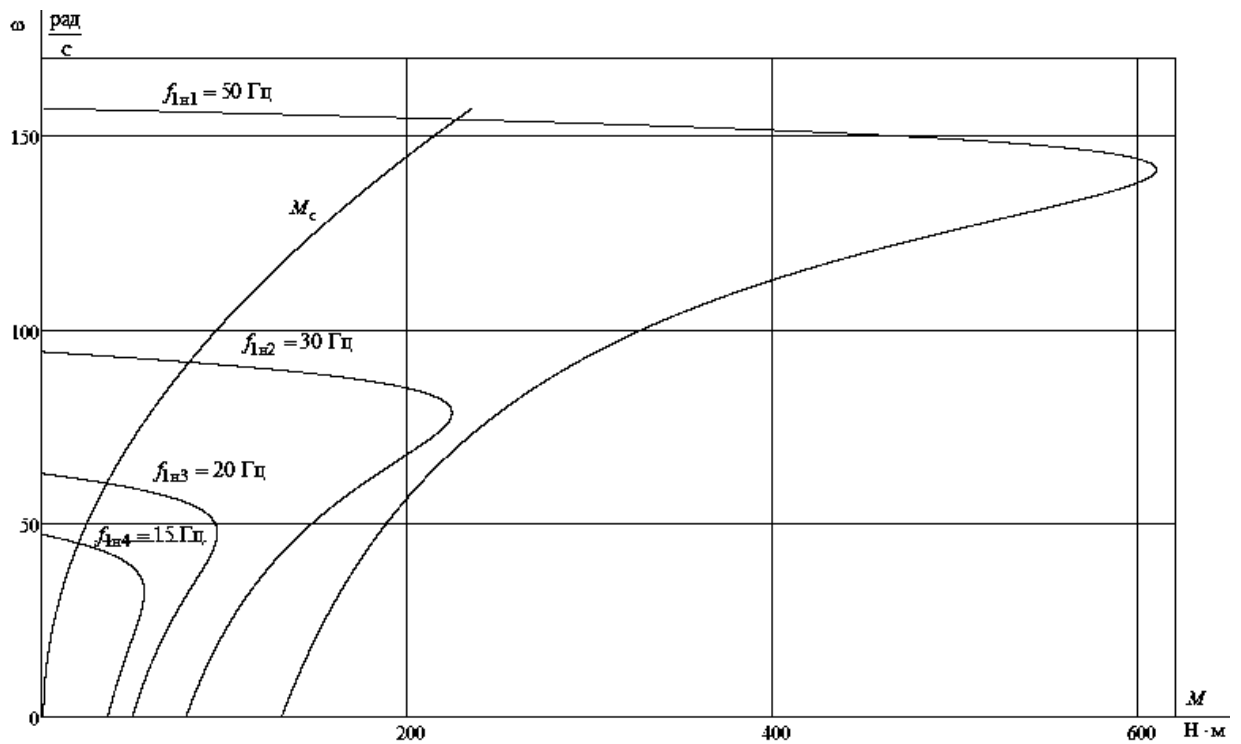


Рисунок 28 – Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$

для закона управления  $\frac{U_1}{f_1^2} = const$

Найдем частоты вращения, при которых происходит пересечение механических характеристик нагрузки и двигателя:

1.  $f_{1n1} = 50 \text{ Гц} - \omega_{p1} = 153,94 \text{ рад/с};$
2.  $f_{1n2} = 30 \text{ Гц} - \omega_{p2} = 91,128 \text{ рад/с};$
3.  $f_{1n3} = 20 \text{ Гц} - \omega_{p3} = 59,52 \text{ рад/с};$
4.  $f_{1n4} = 15 \text{ Гц} - \omega_{p4} = 44,171 \text{ рад/с};$

Определим момент нагрузки и скольжение для каждой частоты вращения.

$$1. M_{c1} = M_0 + k \cdot \omega_{p1}^2 = 1,2 + 0,01009 \cdot 153,94^2 = 240,36 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p1} = \frac{\omega_{01} - \omega_{p1}}{\omega_{01}} = \frac{157,08 - 153,94}{157,08} = 0,02 \text{ о.е.}$$

$$2. M_{c2} = M_0 + k \cdot \omega_{p2}^2 = 1,2 + 0,01009 \cdot 91,128^2 = 85,1 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p2} = \frac{\omega_{02} - \omega_{p2}}{\omega_{02}} = \frac{94,25 - 91,128}{94,25} = 0,0331 \text{ о.е.}$$



$$3. M_{c3} = M_0 + k \cdot \omega_{p3}^2 = 1,2 + 0,01009 \cdot 59,52^2 = 36,953 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p3} = \frac{\omega_{03} - \omega_{p3}}{\omega_{03}} = \frac{62,83 - 59,52}{62,83} = 0,0527 \text{ о.е.}.$$

$$4. M_{c4} = M_0 + k \cdot \omega_{p4}^2 = 1,2 + 0,01009 \cdot 44,171^2 = 20,88 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{p3} = \frac{\omega_{03} - \omega_{p3}}{\omega_{03}} = \frac{47,12 - 44,171}{47,12} = 0,0625 \text{ о.е.}.$$

Потери в роторе рассчитаем по выражению:

$$\Delta P_2 = \omega_0 \cdot s_p \cdot M_c$$

$$\Delta P_{21} = \omega_{01} \cdot s_{p1} \cdot M_{c1} = 157,08 \cdot 0,02 \cdot 240,36 = 755,1 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{22} = \omega_{02} \cdot s_{p2} \cdot M_{c2} = 94,25 \cdot 0,0331 \cdot 85,01 = 265,21 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{23} = \omega_{03} \cdot s_{p3} \cdot M_{c3} = 62,83 \cdot 0,0527 \cdot 36,953 = 122,38 \text{ Вт};$$

$$\Delta P_{24} = \omega_{04} \cdot s_{p4} \cdot M_{c4} = 47,12 \cdot 0,0625 \cdot 20,88 = 61,49 \text{ Вт}.$$

Анализируя потери в роторе можно сказать, что уменьшение частоты приводит к их уменьшению. Это можно объяснить тем что момент нагрузки прямо пропорционален частоте вращения.

По 4 расчетным точка построим кривую отражающую зависимость потерь в роторе от частоты питающего напряжения. Она изображена на рисунке 29.

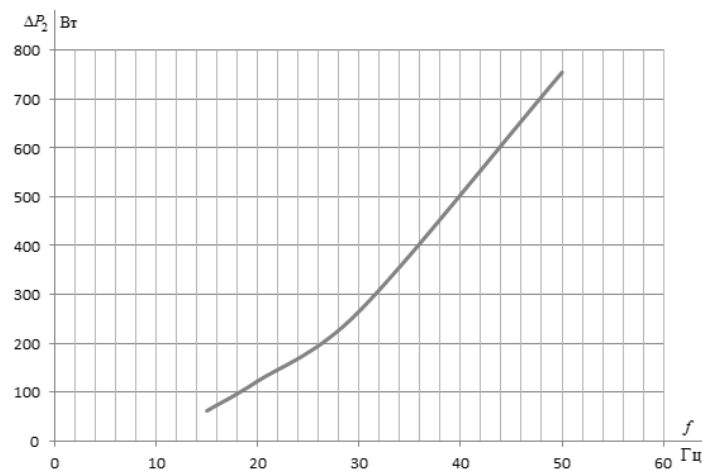


Рисунок 29 – Зависимость потерь в роторе от частоты питающего напряжения

## 5.4 Расчет и построение естественных механических и электромеханических характеристик замкнутой системы “преобразователь частоты - асинхронный двигатель” с IR-компенсацией

Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией приведена на рисунке 30.

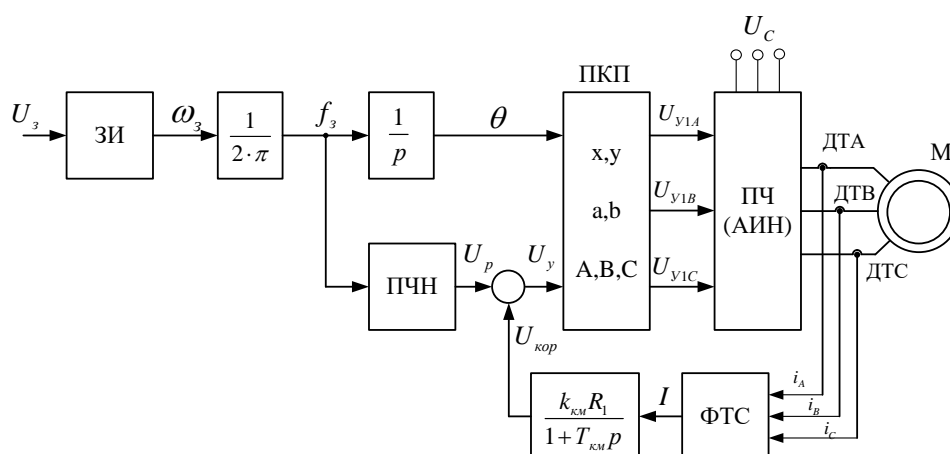


Рисунок 30 – Структурная схема системы скалярного частотного управления с IR-компенсацией

Теоретически и практически доказано, что в классе законов  $U_{1j} / f_{1j}$  невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики в широком диапазоне скоростей и изменения нагрузки. Основная причина этого – возрастания влияния активного сопротивления обмотки статора при снижении частоты питающего напряжения. В асинхронных частотно-регулируемых электроприводах со скалярным управлением, кроме законов  $U_{1j} / f_{1j}$ , получили применение и другие законы регулирования:  $E_1 / f_1$ ,  $E_m / f_1$ ,  $E'_2 / f_1$ .

На практике наибольшее распространение получил такие способы частотного регулирования скорости как  $E_{1j} / f_{1j} = const$ ,  $E_{1j} / f_{1j}^2 = const$ ,  $E_{1j} / \sqrt{f_{1j}} = const$ . При регулировании скорости в классе законов  $E_{1j} / f_{1j}$  необходимо повышать фазное напряжение  $U_{1j} = E_{1j} + I_1 \cdot R_1$  на величину падения напряжения  $I_1 \cdot R_1$  на активном сопротивлении обмотки статора, а

способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название – частотное регулирование с IR-компенсацией.

Задатчик интенсивности формирует кривую и темп разгона двигателя. При дистанционном управлении электроприводом сигналом задания скорости является задающее напряжение  $U_z$ . Ему соответствует задающая частота  $f_z$  местного управления, в этом случае управление пуском и остановом двигателем производится с панели преобразователя. Блок “преобразователь частота-напряжение” ПЧН формирует требуемую зависимость скалярного управления между частотой и напряжением преобразователя, чем и устанавливается принятый закон частотного регулирования  $E_{1j} / f_{1j}^2 = const$ .

При скалярной IR-компенсации сигнал управления  $U_y$  является суммой сигналов регулирования  $U_p$  и положительной обратной связи по току  $U_{кор}$ :

$$U_y = U_p + U_{кор} = U_p + k_{км} \cdot R_1 \cdot I ,$$

где  $k_{км}$  – коэффициент положительной обратной связи по току;

$R_1$ - активное сопротивление фазы обмотки статора АД;

$I$  – сигнал пропорциональный действующим значениям токов  $i_a, i_b, i_c$  обмоток статора АД.

Сигнал управления является входным для прямого координатного преобразователя (ПКП), на выходе которого формируется три синусоидальных напряжения управления  $U_{1yA}, U_{1yB}, U_{1yC}$  сдвинутые относительно друг друга на угол  $\pm 2\pi/3$ , с амплитудами пропорциональными напряжению управления. Сигналы  $U_{1yA}, U_{1yB}, U_{1yC}$  формируют фазные напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН).

Произведем расчет статических характеристик.

Примем коэффициенты компенсации:  $K_{км}=0,25; 0,5; 0,75$ .

Найдем эквивалентные сопротивление ротора с учетом IR – компенсации:

$$R_{1\text{ЭKB1}} = R_1 \cdot (1 - K_{\text{KM1}}) = 0,0703 \cdot (1 - 0,25) = 0,0527 \text{ Ом}$$

$$R_{1\text{ЭKB2}} = R_1 \cdot (1 - K_{\text{KM2}}) = 0,0703 \cdot (1 - 0,5) = 0,0352 \text{ Ом}$$

$$R_{1\text{ЭKB3}} = R_1 \cdot (1 - K_{\text{KM3}}) = 0,0703 \cdot (1 - 0,75) = 0,0176 \text{ Ом}$$

Строим электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$  для выбранных частот и коэффициентов  $K_{\text{KM}}$  (рис.31) по выражениям:

$$I_2'(s, f, K_{\text{KM}}) = \frac{U_1(f)}{\sqrt{\left( R_{1\text{ЭKB}}(K_{\text{KM}}) + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{\text{KH}}^2 \cdot f_{1*}^2(f) + \left( \frac{R_{1\text{ЭKB}}(K_{\text{KM}}) \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu\text{H}} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2}},$$

где  $R_{1\text{ЭKB}}(K_{\text{KM}}) = R_1 \cdot (1 - K_{\text{KM}})$  – эквивалентное активное сопротивление статорной цепи.

$$\omega(s, f) = \omega_0(f) \cdot (1 - s),$$

$$f_{1*}(f) = \frac{f}{f_{1\text{H}}} \text{ – относительная частота питающего напряжения;}$$

$\omega_0(f) = \omega_{0\text{H}} \cdot f_{1*}(f)$  – скорость идеального холостого хода при данной частоте напряжения питания, в диапазоне скорости  $\omega = 0 \div \omega_0$ .

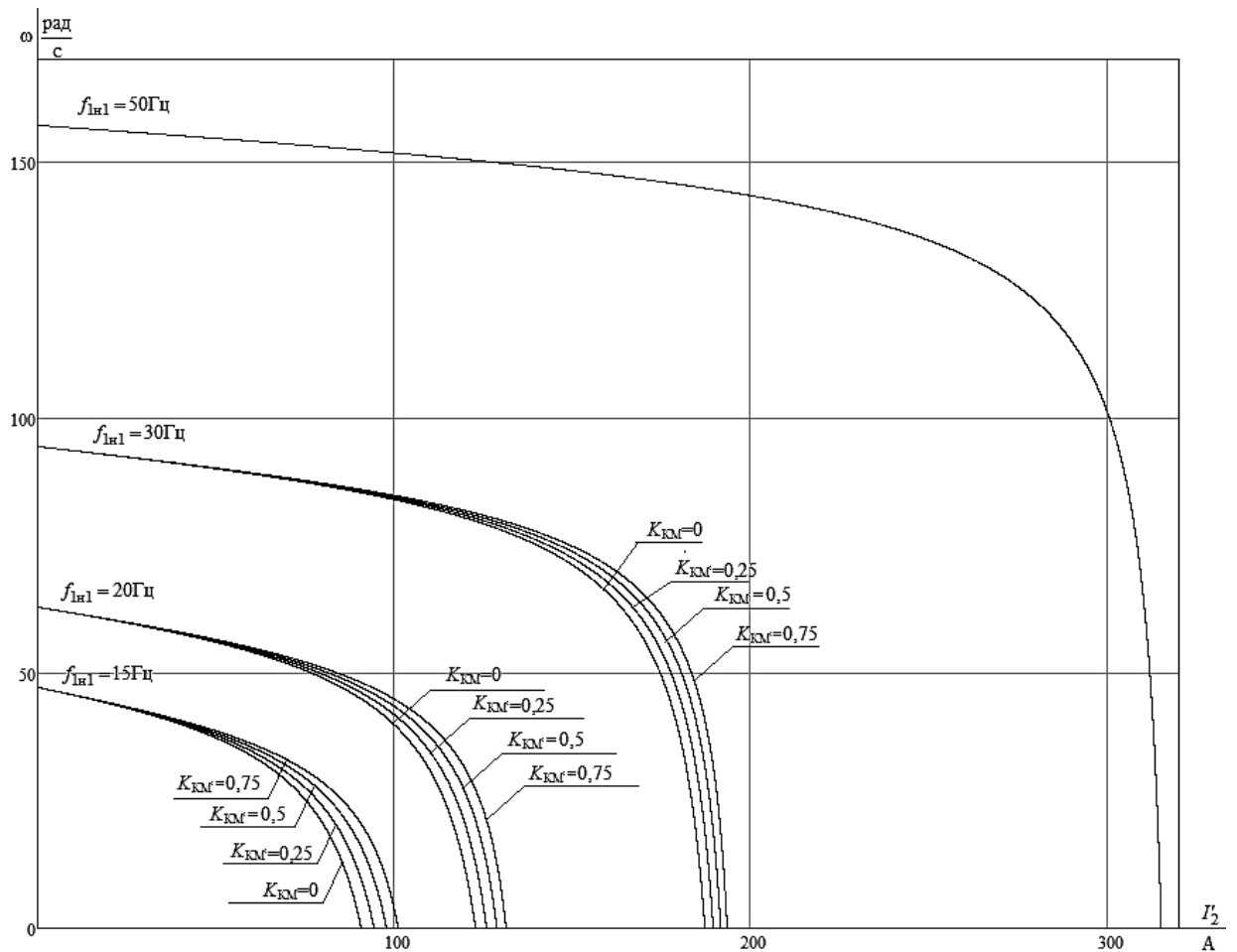


Рисунок 31 – Искусственные электромеханические характеристики  $\Gamma_2(\omega)$  при частотном регулировании скорости с ИР-компенсацией

Также строим электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  для выбранных частот и коэффициентов  $K_{KM}$  (рис.32) по выражениям

$$I_1(s, f, K_{KM}) = \sqrt{(I_0(f))^2 + (I_2'(s, f, K_{KM}))^2 + 2 \cdot I_0(f) \cdot I_2'(s, f, K_{KM}) \cdot \sin \phi_2(s, f, K_{KM})},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s),$$

$$\text{где } \sin \phi_2(s, f, K_{KM}) = \frac{X_{KH} \cdot f_{1*}(f)}{\sqrt{\left(R_{1\text{экв}}(K_{KM}) + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{KH}^2 \cdot f_{1*}^2(f)}};$$

$$I_0(f) = \frac{U_1(f)}{X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} - \text{ток холостого хода асинхронного двигателя в}$$

зависимости от частоты.

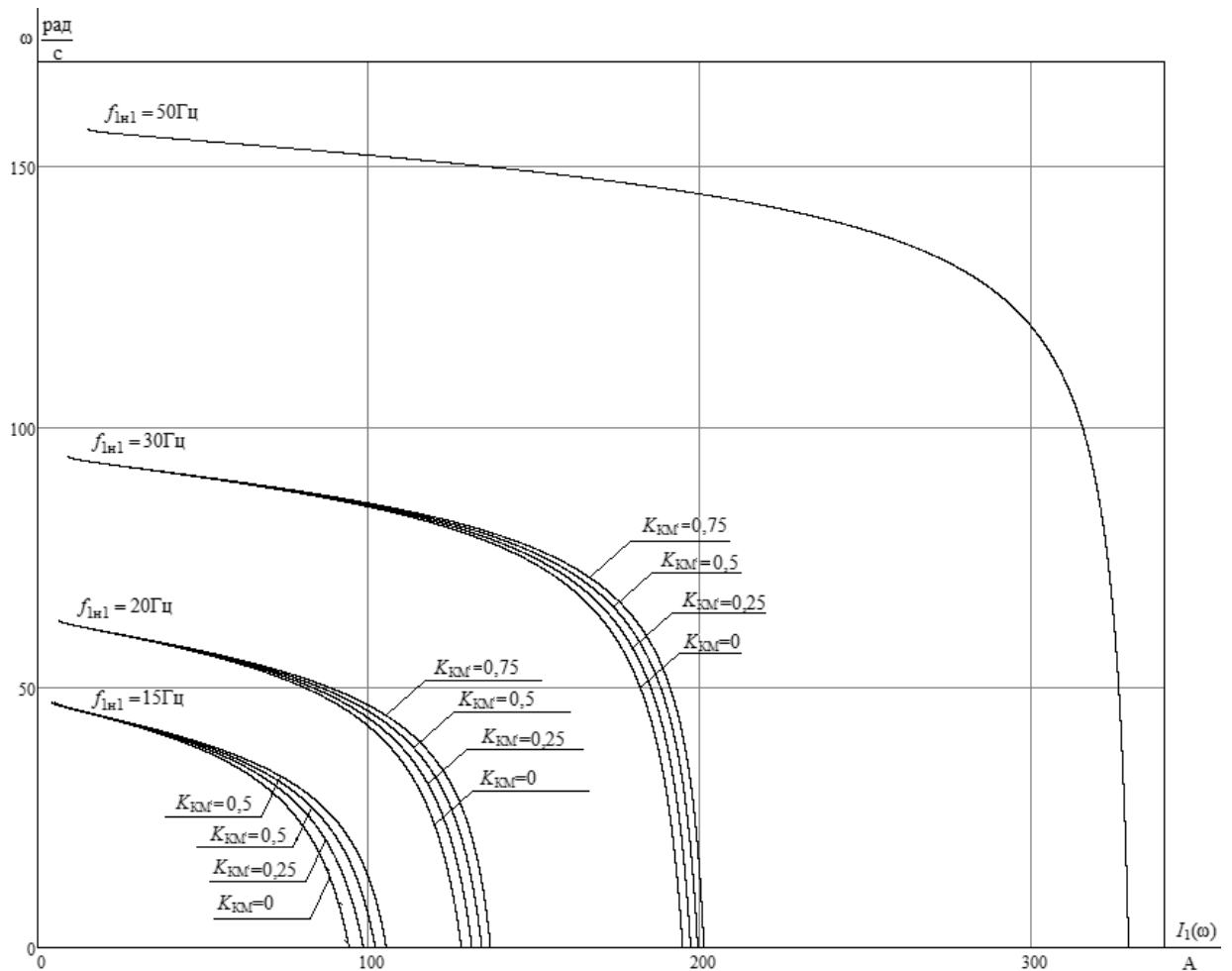


Рисунок 32 – Искусственные электромеханические характеристики  $I_1(\omega)$  при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

Механические характеристики асинхронного двигателя  $M(\omega)$  (рис.33) рассчитываем для выбранных частот и коэффициентов  $K_{KM}$  по выражениям

$$M(s, f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2 \cdot R'_2}{\omega_0(f) \cdot s \cdot \left[ X_{KH}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2 + \left( R_{1\Delta KB}(K_{KM}) + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left( \frac{R_{1\Delta KB}(K_{KM}) \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu H} \cdot f_{1*}(f)} \right)^2 \right]},$$

$$\omega(s, f) = \omega_0(f)(1 - s).$$

Критические момент и скольжение можно определить по выражениям

$$M_K(f) = \frac{3 \cdot (U_1(f))^2}{2 \cdot \omega_0(f) \cdot \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right] \cdot \left( 1 + \frac{R_1^2}{X_{\mu H}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2} \right)},$$

$$s_k(f) = R'_2 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{R_1^2}{X_{\mu n}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}}{R_1^2 + X_{\mu n}^2 \cdot (f_{1*}(f))^2}},$$

$$\omega_k(f) = \omega(s_k(f), f).$$

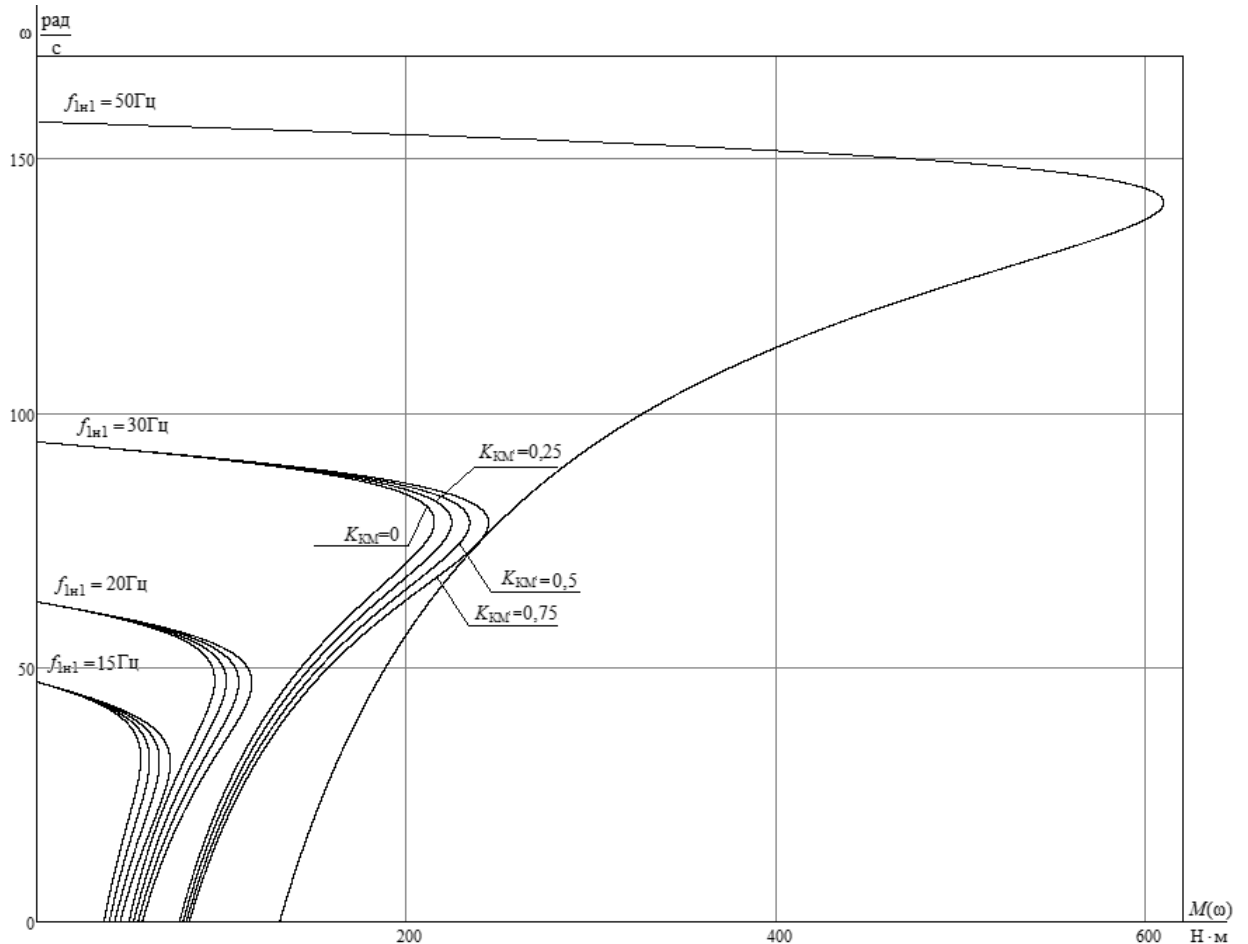


Рисунок 33 – Искусственные механические характеристики  $M(\omega)$  при частотном регулировании скорости с IR-компенсацией

При работе на естественной характеристике ( $f=50$  Гц) IR-компенсация не применяется, так как фазное напряжение повышается выше номинального что недопустимо.

Электромеханические характеристики:

На рисунке 31 видно, что при увеличении коэффициента компенсации момента  $K_{KM}$  токи короткого замыкания  $I_{KЗ}$  имеют большие значения, причем эти различия тем больше, чем меньше частота обмоток статора  $f_1$ . Это объясняется тем, что при малых частотах больше доля падения

напряжения на активном сопротивлении  $R_1$ , следовательно, больше доля компенсации.

Механические характеристики:

При увеличении коэффициента компенсации момента  $K_{KM}$  критический момент увеличивается, а характеристики становятся более жесткими. На графике различия в критическом и пусковом моментах при различных  $K_{KM}$  не так заметны. Это можно объяснить тем, что мощность двигателя велика и сопротивление его статорной обмотки мало, а соответственно и падение напряжения на ней невелико.

## 5.5. Разработка системы скалярного управления насоса в системе MatLab.

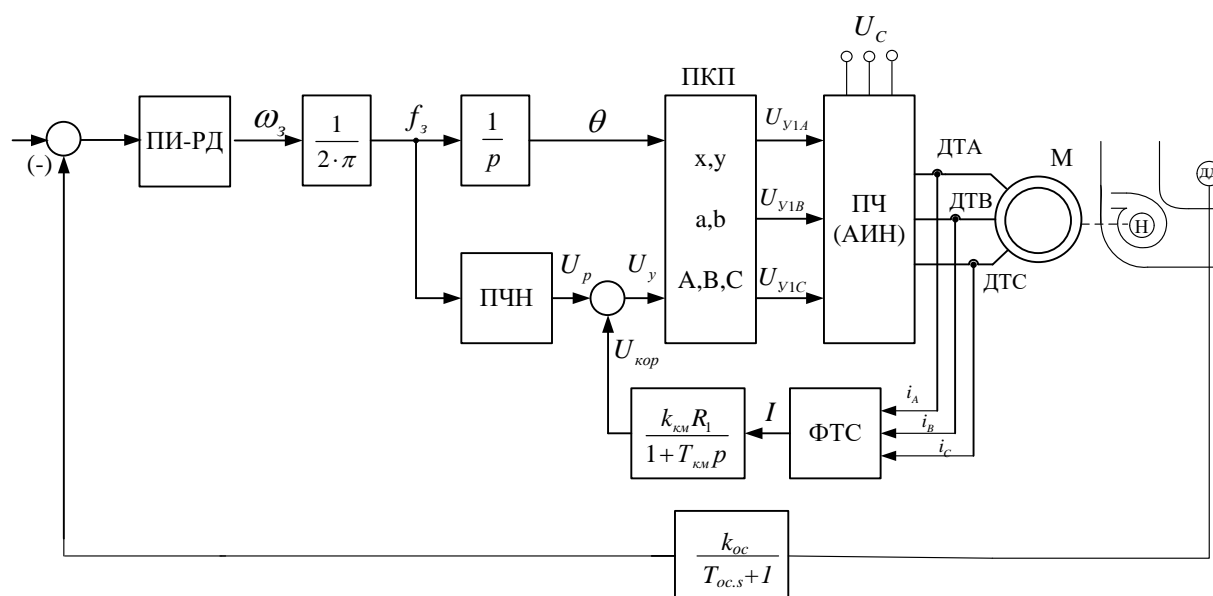


Рисунок 34 – Структурная схема частотного - регулируемого электропривода насоса в системе поддержания давления воды со скалярной IR-компенсацией

Моделирование асинхронного двигателя осуществим с помощью программы MATLAB Simulink. Для создания имитационной модели найдем следующие параметры двигателя.

Индуктивность фазы обмотки статора:



$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,287}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0009 \text{ Гн}$$

Индуктивность фазы обмотки ротора:

$$L'_{1\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,391}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0012 \text{ Гн}$$

Индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{14,58}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,046 \text{ Гн}$$

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярным управлением может быть реализован на основании структурной схемы асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора  $\alpha, \beta$  (рис. 35).

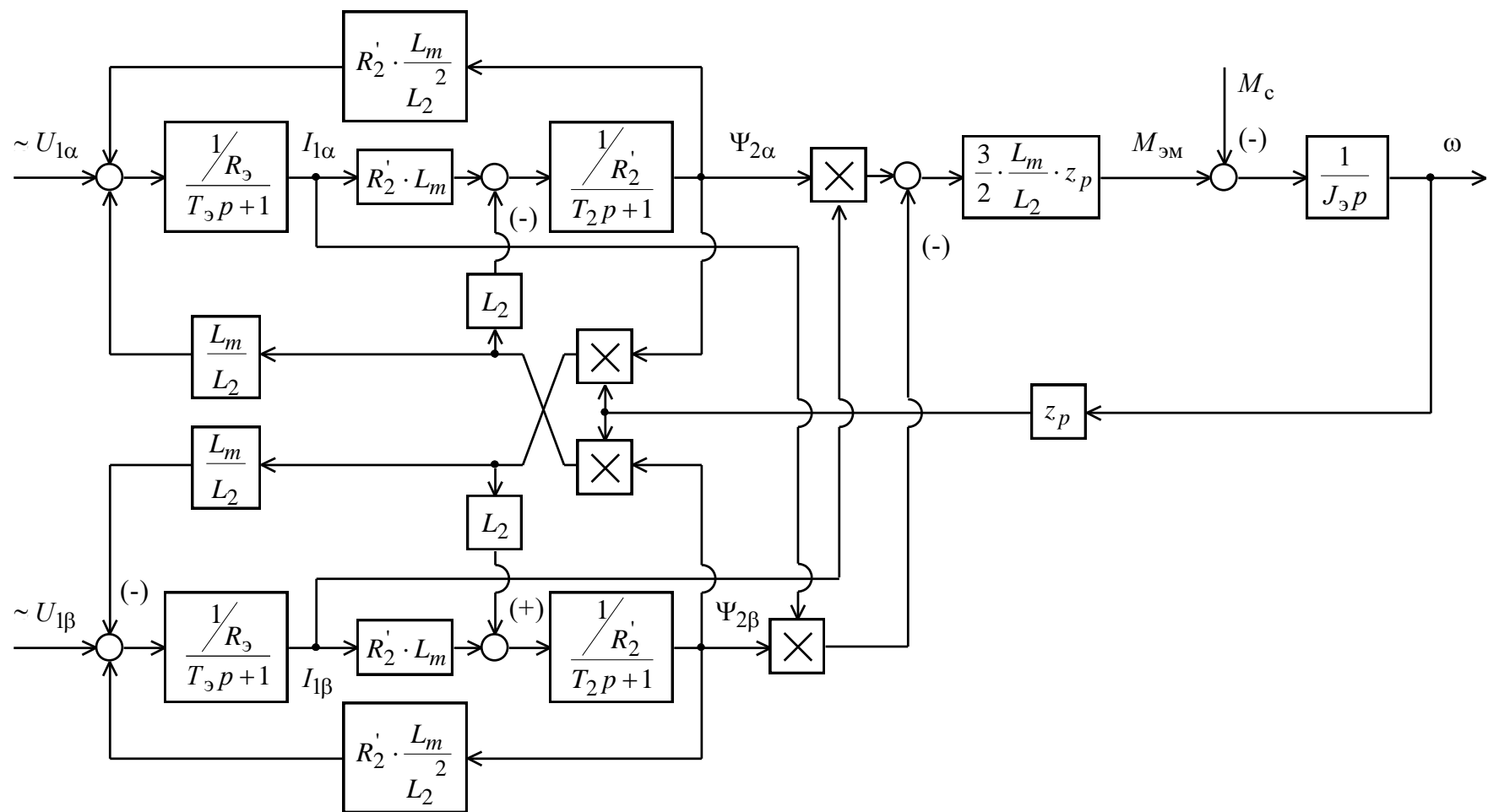


Рисунок 35 - Структурная схема электродвигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

Для начала рассмотрим контур давления:

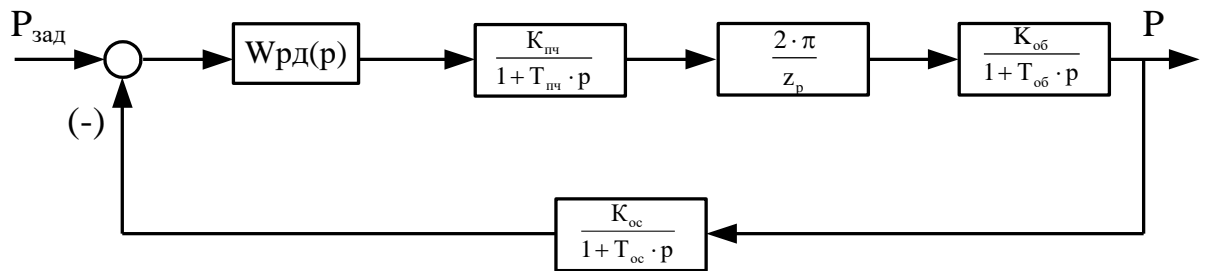


Рисунок 36 – Структурная схема контура давления

На рисунке приняты следующие обозначения:

$W_{рД}(p)$  - передаточная функция регулятора давления;

$K_{пч}$  - коэффициент передачи инвертора;

$K_{об}$  - коэффициент передачи насоса;  $K_{об} = \frac{p}{\omega_H} = \frac{4}{78,535} = 0,0509$

где  $p=4$  – номинальное при  $\omega_H/2$

$K_{ос}$  - коэффициент передачи обратной связи;

$T_{пч}$  - постоянная времени запаздывания автономного инвертора

напряжения; где  $T_{пч} = \frac{1}{5000} = 0,0002$  с

$T_{об}$  - постоянная времени запаздывания насоса;  $T_{пч} = 0,1$  с

$T_{ос}$  - постоянная времени запаздывания обратной связи.  $T_{ос} = 0,1$  с

Синтез регулятора давления на модульный оптимум.

Разомкнутый контур давления, настроенный на модульный оптимум, должен иметь следующую передаточную функцию:

$$W_{ТО}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)}$$

где  $T_{\mu}$  - малая постоянная времени контура давления.

Передаточная функция разомкнутого контура давления системы определяется следующим образом:

$$W_{\text{РАЗКД}}(p) = W_{\text{рд}}(p) \cdot \frac{2\pi}{z_P} \cdot \frac{K_{\text{ПЧ}}}{1 + T_{\text{ПЧ}}p} \cdot \frac{K_{\text{об}}}{1 + T_{\text{об}}p} \cdot \frac{K_{\text{ос}}}{1 + T_{\text{ос}}p}$$

отсюда получаем:

$$W_{\text{рд}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu} p (T_{\mu} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\text{ПЧ}} p + 1)(T_{\text{об}} p + 1)(T_{\text{ос}} p + 1)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{об}} \cdot K_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_P}{2\pi}$$

При оптимизации, инерционность в канале обратной связи относится к «малым», и за малую некомпенсируемую постоянную времени всего контура принимают:

$$T_{\mu k} = T_{\mu} + T_{\text{ос}} = 0,0002 + 0,1 = 0,1002 \text{ с}$$

$$T_{\text{об}} \gg T_{\text{ПЧ}}$$

$$T_{\text{ПЧ}} = T_{\mu}$$

$$W_{\text{рд}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k} p (T_{\mu k} p + 1)} \cdot \frac{(T_{\mu k} p + 1)(T_{\text{об}} p + 1)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{об}} \cdot K_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_P}{2\pi}$$

$$W_{\text{рд}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu k} p} \cdot \frac{(T_{\text{об}} p + 1)}{K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{об}} \cdot K_{\text{ос}}} \cdot \frac{z_P}{2\pi}$$

После сокращения домножим полученное выражение на  $T_{\text{об}}$  после чего приведём выражение к каноническому виду.

$$\begin{aligned} W_{\text{рд}} &= \frac{T_{\text{об}} \cdot z_P}{2 \cdot T_{\mu k} \cdot K_{\text{ПЧ}} \cdot K_{\text{об}} \cdot K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \frac{(T_{\text{об}} p + 1)}{T_{\text{об}} p} = \\ &= \frac{0,1 \cdot 2}{2 \cdot 0,1002 \cdot 1 \cdot 0,0509 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3,14} \cdot \frac{(0,1 p + 1)}{0,1 p} = 3,063 \cdot \frac{(0,1 p + 1)}{0,1 p} \end{aligned}$$

На рисунке 37 представлена имитационная модель контура давления.

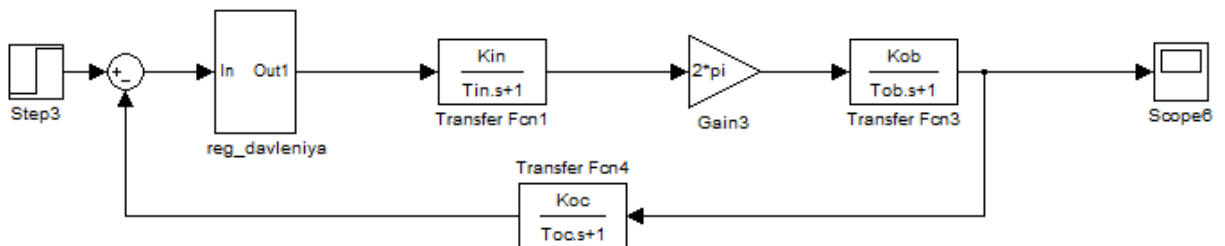


Рисунок 37 – Имитационная модель контура давления

На рисунке 38 Представлена имитационная модель ПИ-регулятора давления.

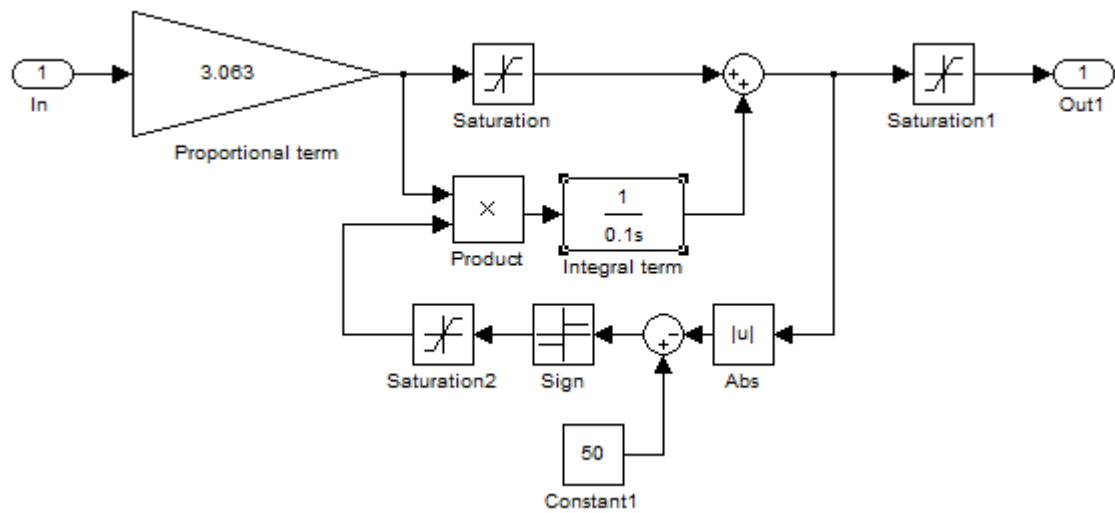


Рисунок 38 – Имитационная модель ПИ-регулятора давления.

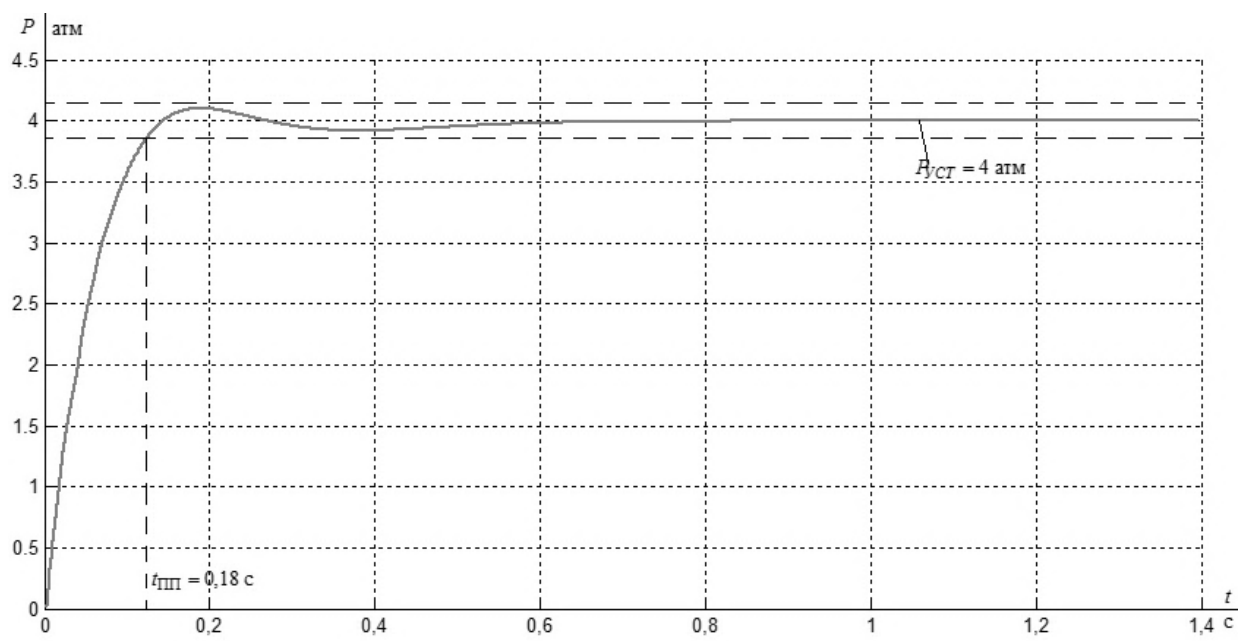


Рисунок 39 – Переходные процессы контура давления.

Таблица 8 – Показатели качества работы контура давления

$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta P_{уст}, A$
Ожидаемые показатели			
0,41082	0,41082	4,3%	0
Результаты моделирования			
0,18	0,18	2,5%	0

$$t_{PY1}^{(5)} = t_{PY2}^{(5)} = 4,1(T_{\mu} + T_{oc}) = 4,1(0,0002 + 0,1) = 0,41082$$

В результате моделирования можно сделать вывод, что контур давления настроен верно.

На рисунке 40 приведена имитационная модель асинхронного частотно-регулируемого электропривода насоса со скалярным управлением, реализованная с использованием модели асинхронного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$ .

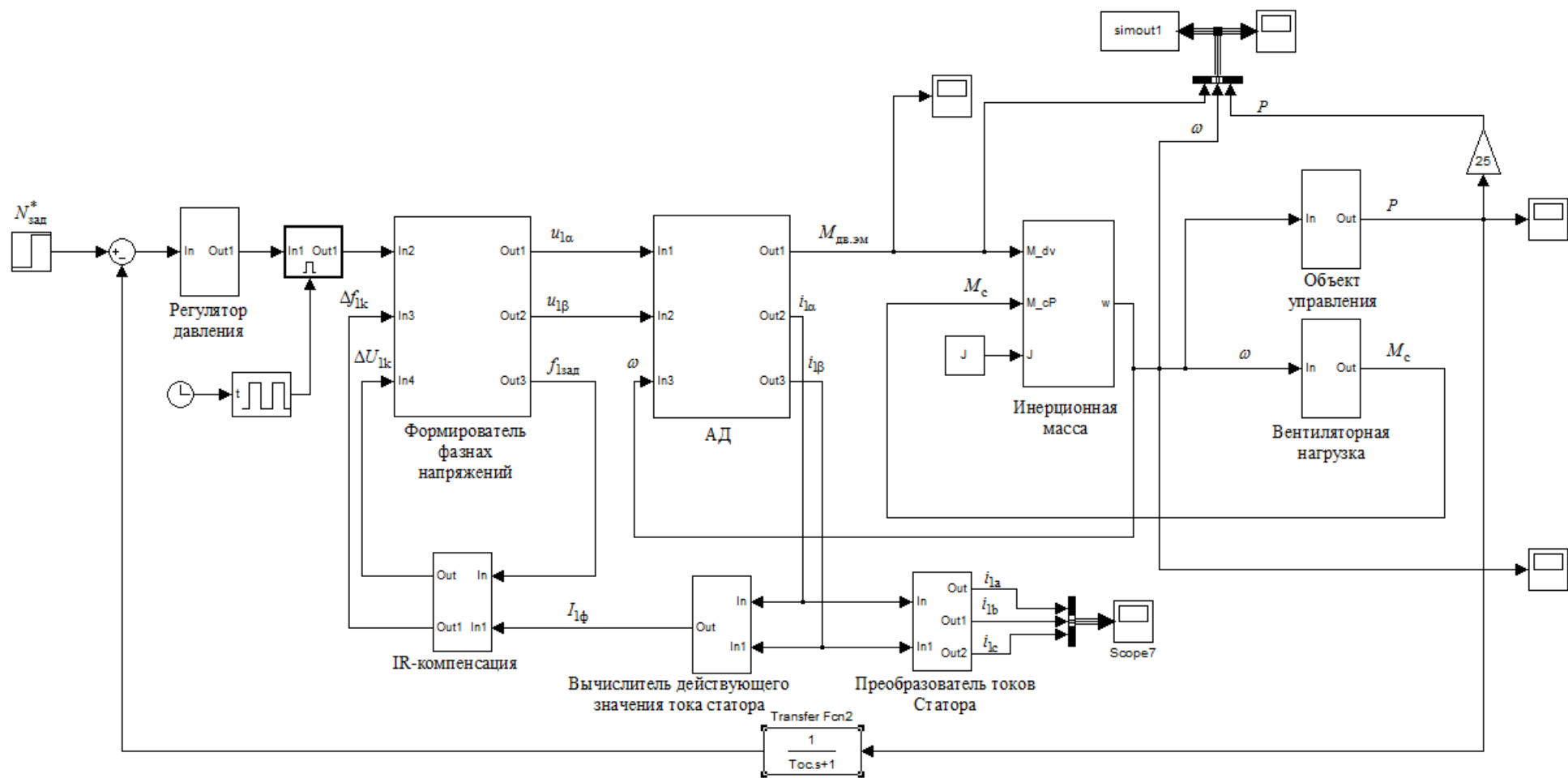


Рисунок 40 - Имитационная модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса при представлении двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

В состав имитационной модели на рисунке 40 входят:

- суперблок формирователя фазных напряжений (рис. 45);
- суперблок двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  (рис.43);
- суперблок одномассовой механической системы (рис.44);
- суперблок преобразователя токов статора из двухфазной неподвижной системы  $\alpha, \beta$  в трехфазную систему координат a, b, c (рис. 41);
- суперблок вычислителя действующего значения тока статора (рис. 42);
- суперблок IR-компенсации (рис.48);
- суперблок ПИ-регулятора давления (рис. 38);
- суперблок вентиляторной нагрузки (рис. 46);
- суперблок объекта регулирования (рис. 47).

Преобразование токов статора  $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$  двухфазного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  в фазные токи обмотки статора трехфазного двигателя  $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ ,  $i_{1c}$  реализуется в соответствии с формулами преобразования

$$i_{1a} = i_{1\alpha}$$

$$i_{1b} = -\frac{1}{2} \cdot i_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta}$$

$$i_{1c} = -\frac{1}{2} \cdot i_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta}$$

По схеме, представленной на рис.41.



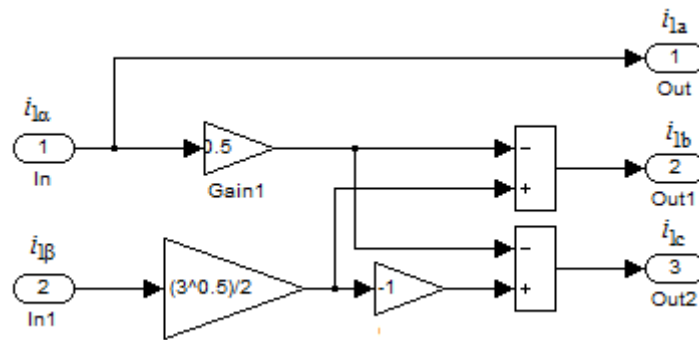


Рисунок 41 – Имитационная модель преобразователя токов статора двухфазного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  в фазные токи статора трехфазного двигателя.

Действующие значения фазных токов трехфазного и двухфазного двигателя равны и определяются по выражению:

$$I_{1\phi} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}, \text{ A}$$

В установившихся режимах работы действующие значения токов обмоток статора двухфазного и трехфазного двигателя равны:

$$I_{1\alpha} = I_{1\beta} = I_{1a} = I_{1b} = I_{1c} = I_{1\phi}$$

Схема набора имитационной модели для вычисления действующего значения тока статора трехфазного двигателя приведена на рис.42

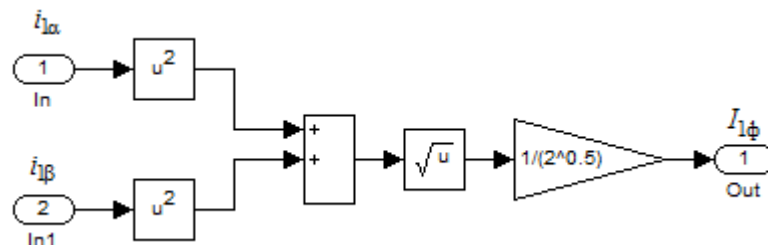


Рисунок 42 – Имитационная модель вычислителя действующего значения тока статора трехфазного двигателя

Схема набора имитационной модели двухфазного асинхронного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  составлена на основании структурной схемы рис.35и приведена на рис. 43.

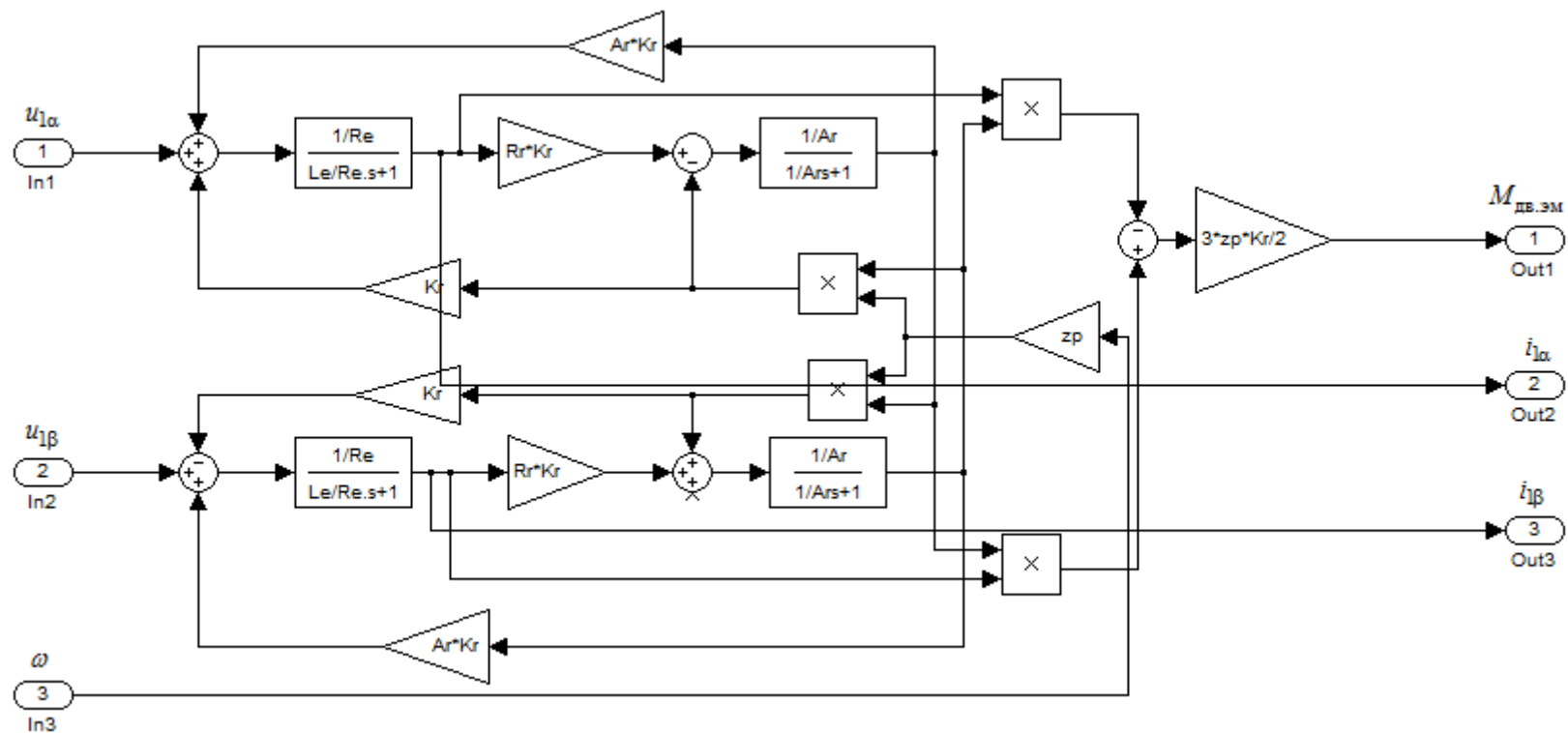


Рисунок 43 – Имитационная модель двухфазного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

Схема набора имитационной модели одномассовой механической системы при моменте нагрузки реактивного характера, приведена на рис. 44.

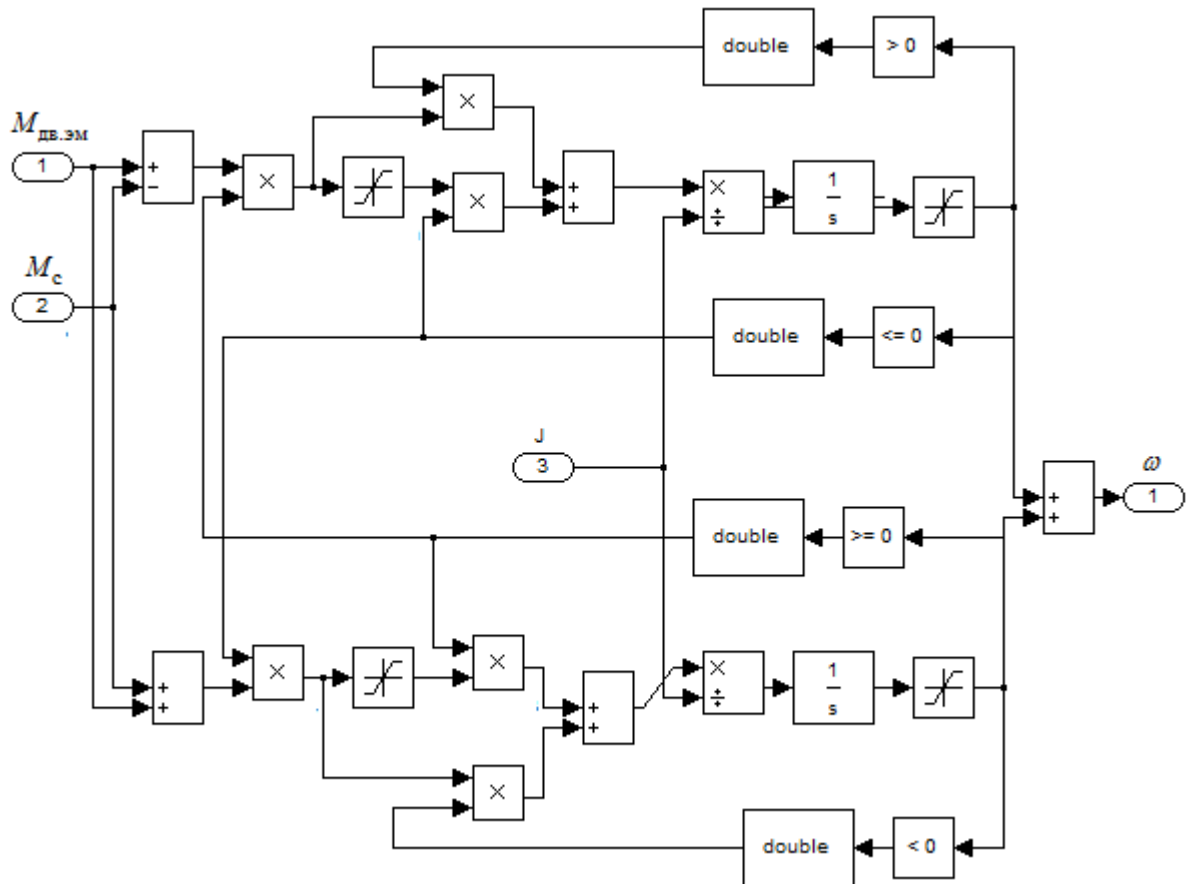


Рисунок 44 – Имитационная модель одномассовой механической системы с моментом нагрузки реактивного характера

При нагрузке реактивного характера  $M_c(\omega) = M_c \cdot \text{sign } \omega$  и выполнение условия  $|M_{\text{дв}}| < M_c$  двигатель, находясь в неподвижном состоянии, не должен трогаться. Если же двигатель вращается, то его дальнейшее движение должно определяться условием:

$$M_{\text{дв}} - M_c \cdot \text{sign } \omega = J_3 \frac{d\omega}{dt}$$

Схема набора имитационной модели формирователя фазных напряжений статорных обмоток двухфазного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  приведена на рис 45.

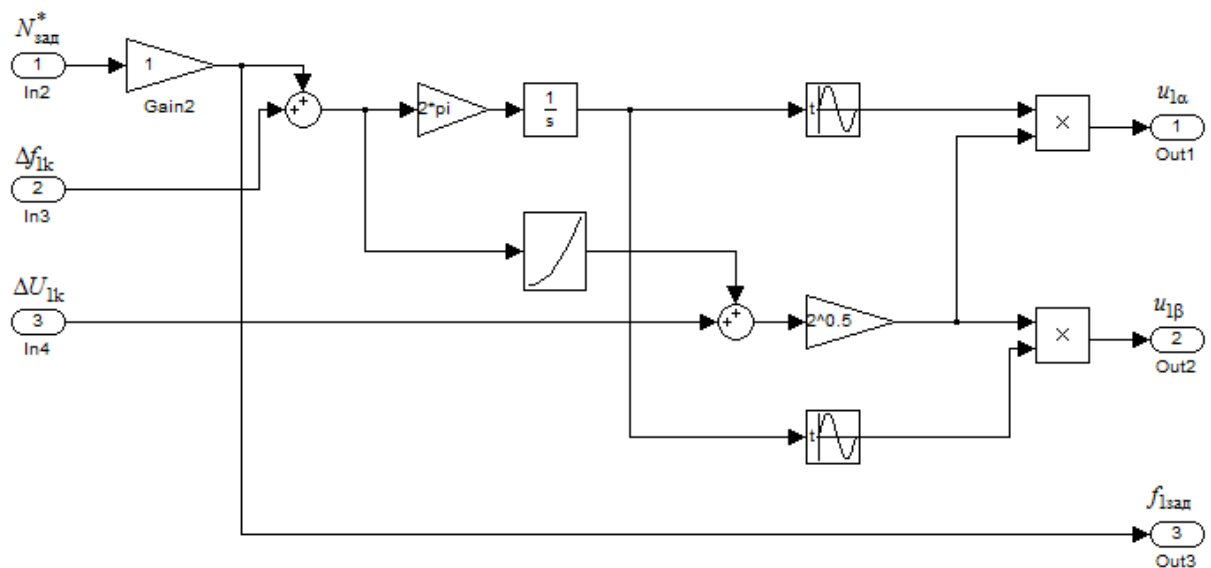


Рисунок 45 - Имитационная модель формирователя фазных напряжений статорных обмоток двухфазного двигателя в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$

Схема набора имитационной модели вентиляторной нагрузки представлена на рис. 46

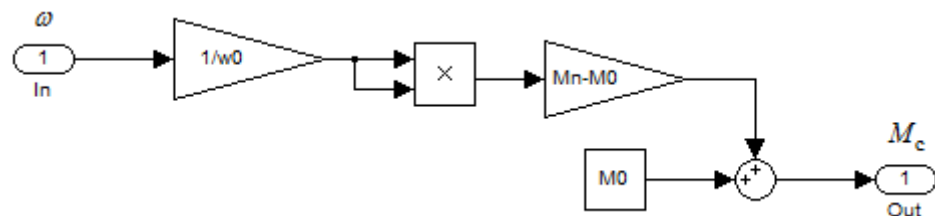


Рисунок 46 - Имитационная модель вентиляторной нагрузки

Схема набора имитационной модели объекта регулирования приведена на рис. 47

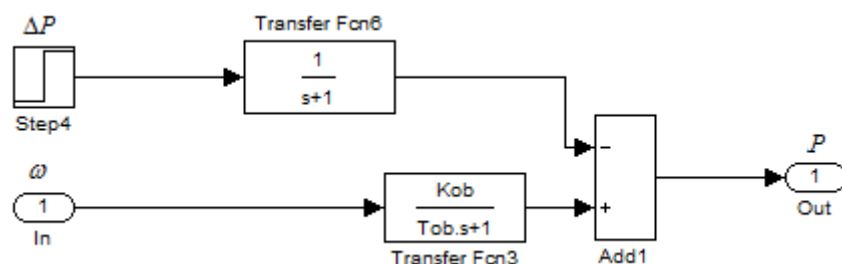


Рисунок 47 – Имитационная модель объекта регулирования

Схема набора имитационной модели IR-компенсации представлена на рис.48.

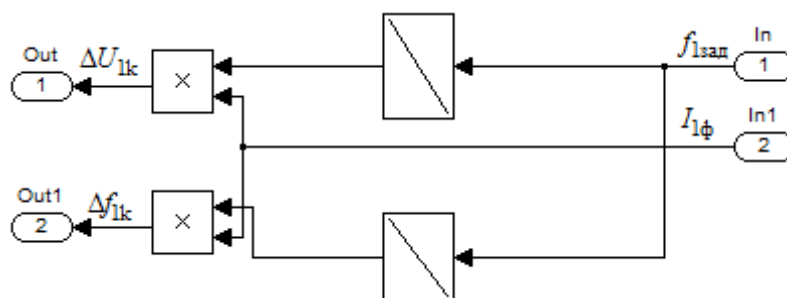


Рисунок 48 - Имитационная модель IR-компенсации

Ниже представлены переходные процессы давления, скорости и момента при номинальном давлении  $p = 4$  атм (рис. 49), падении и нарастании давления  $\Delta p = 1$  атм (рис. 50), падении и нарастании давления  $\Delta p = 0,5$  атм (рис. 51), моделирования системы поддержания давления при имитации небольшой части графика нагрузок водопотребления (рис. 52).

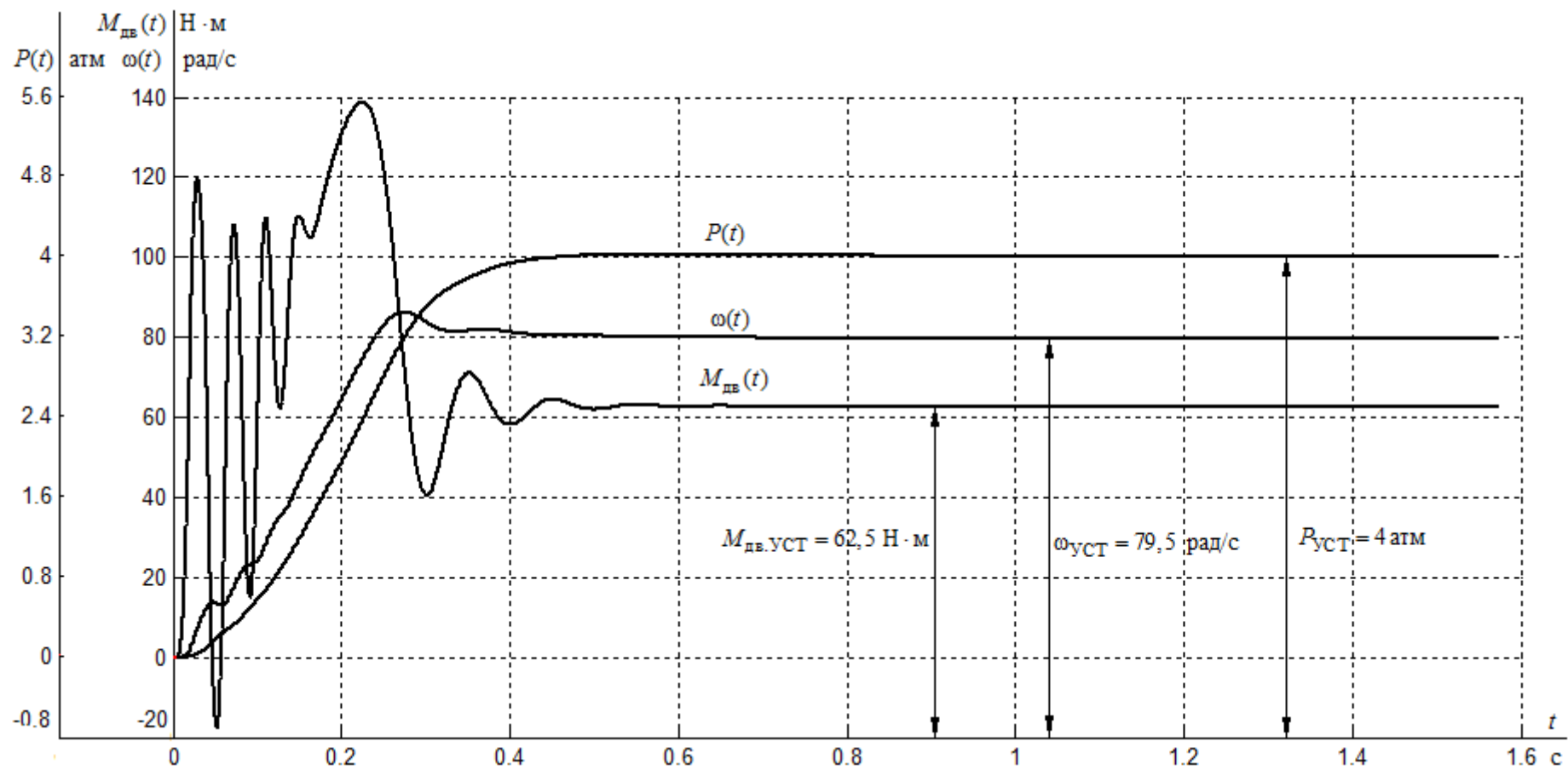


Рисунок 49 – Переходные процессы давления  $P(t)$ , скорости  $\omega(t)$  и момента  $M_{дв}(t)$  при номинальном давлении

$$P_{уст} = 4 \text{ атм}$$

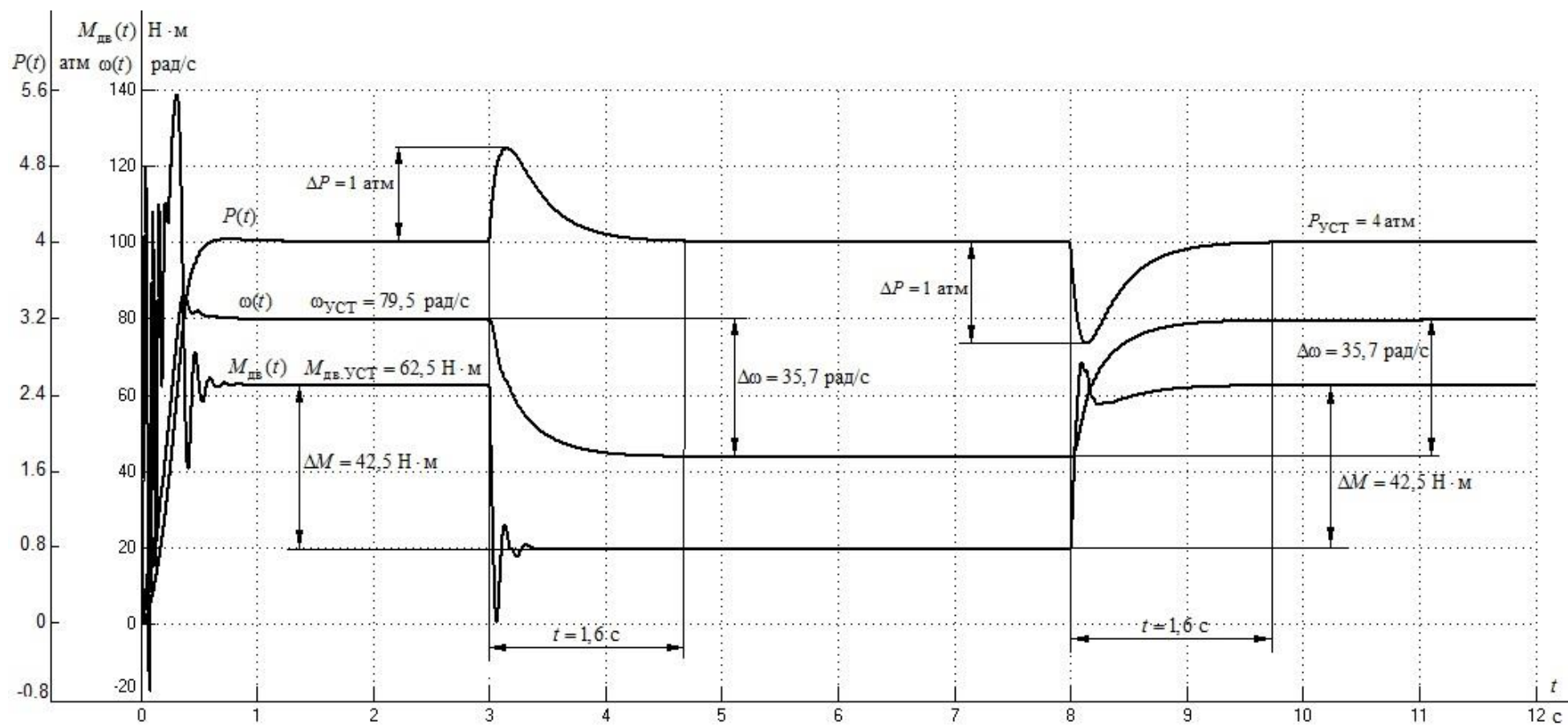


Рисунок 50 – Переходные процессы давления  $P(t)$ , скорости  $\omega(t)$  и момента  $M_{\text{дв}}(t)$  при падении и нарастании давления  $\Delta p = 1 \text{ атм}$



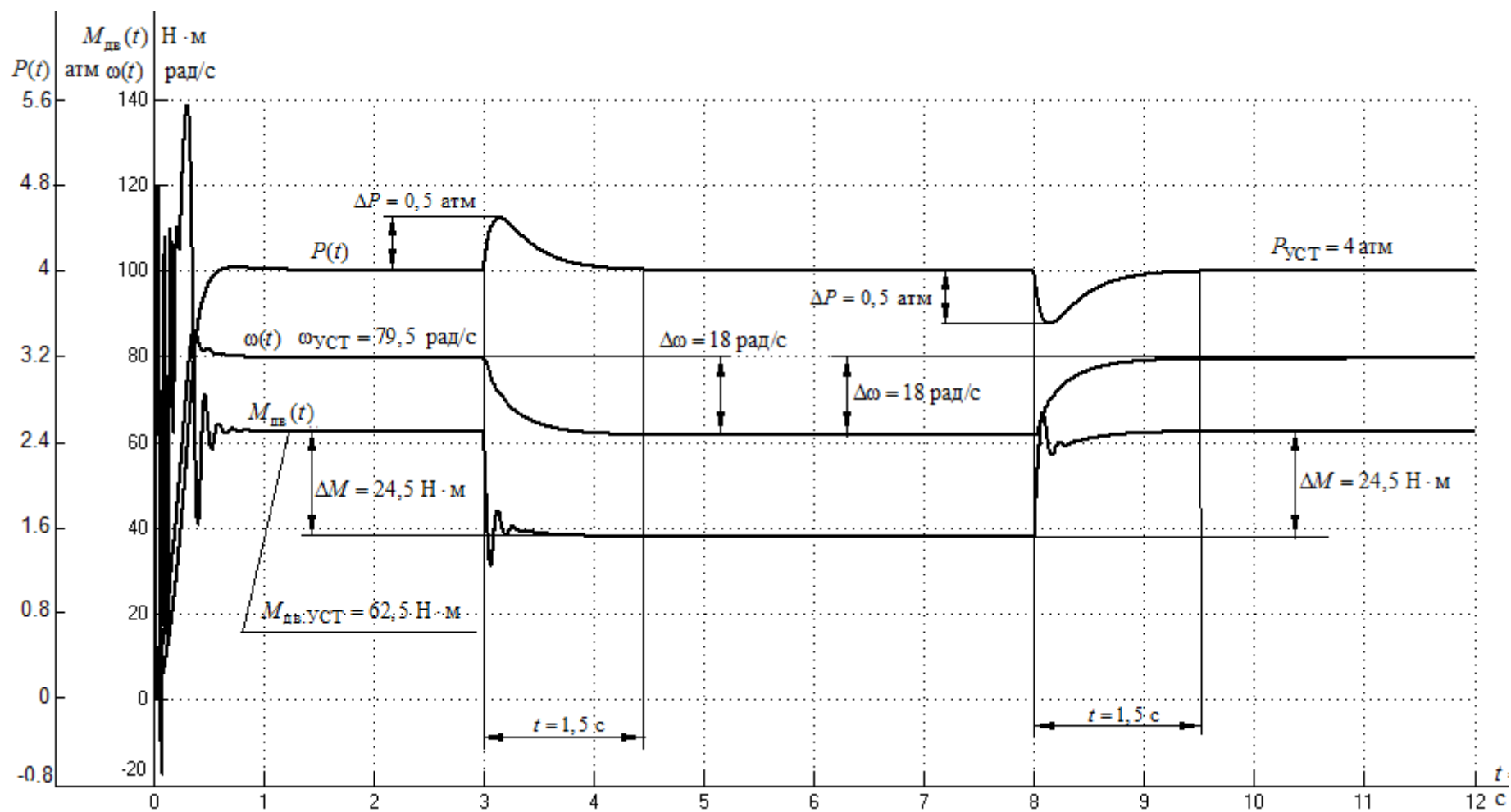


Рисунок 51 – Переходные процессы давления  $P(t)$ , скорости  $\omega(t)$  и момента  $M_{дв}(t)$  при падении и нарастании давления  $\Delta p = 0,5$  атм

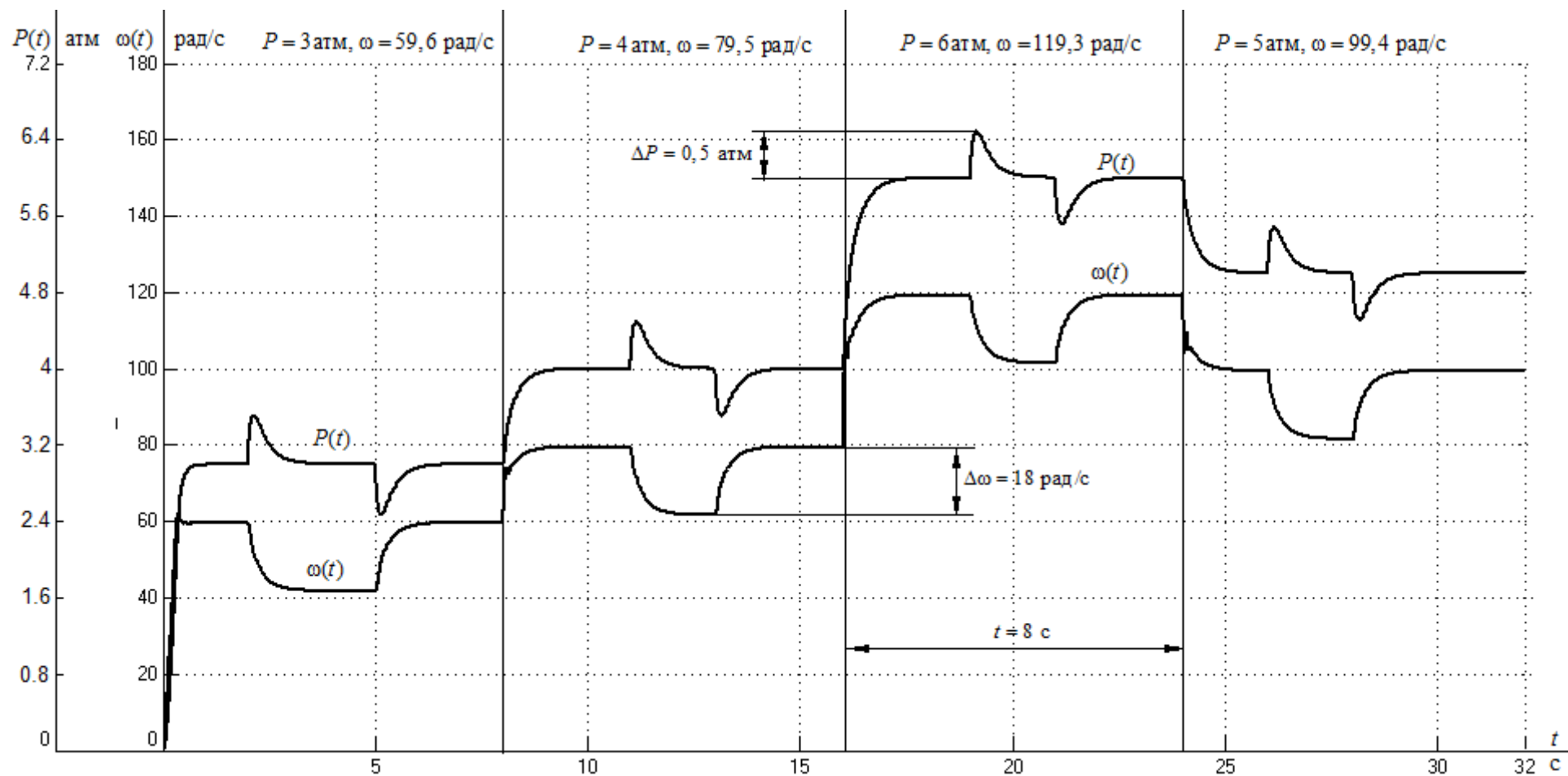


Рисунок 52 – Переходные процессы давления  $P(t)$  и скорости  $\omega(t)$  небольшой части графика нагрузок водопотребления и при падении и нарастании давления  $\Delta p = 0,5$  атм

В результате проведенных исследований можно сделать вывод что система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» работает верно и реагирует на различные изменения давления, а также можно сделать настройку преобразователя на частоты на суточный график водопотребления – что оптимизирует работу насосной станции.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5AM88	Мауреру Вячеславу Евгеньевичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	При проведении исследований используется материально-техническая база НИ ТПУ, в исследовании задействованы 2 человека: научный руководитель и инженер-дипломник. Бюджет проекта не более 500000 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» Интегральный показатель эффективности не менее 4 баллов.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды составляют 27,1 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Анализ и оценка научно-технического уровня проекта (НТИ)</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Не разрабатывается</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Разработка календарного плана работ, формирование сметы затрат.</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Определение ресурсной эффективности</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка

3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Любовь Юрьевна	Кандидат экономических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Маурер Вячеслав Евгеньевич		

## **6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ**

### **РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Цель раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» – определение экономической целесообразности использования частотно-регулируемого асинхронного электропривода насоса системы водоснабжения, а также оценка ресурсоэффективности и конкурентоспособности проекта.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценить коммерческий потенциал и перспективность проведения научного исследования;
- Произвести планирование научно-исследовательских работ;
- Определить ресурсную и финансовую эффективность исследования.

#### **6.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Чтобы определить потенциальных потребителей данной разработки, необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Выпускная квалификационная работа посвящена частотно-регулируемому асинхронному электроприводу насоса системы водоснабжения. Новые технологии и модернизация существующего оборудования, являются существенным фактором для успешного продвижения продукта. Современный рынок требует от отечественных производителей коренной реконструкции и модернизации устаревшего производственного оборудования. Совершенствование производственных технологий с целью повышения качества продукции, экономии затраченных средств, внедрение новых идей и, таким образом, появление новых продуктов с новыми свойствами - все это в условиях свободной конкуренции на рынке требуют производителям разработать и внедрить новое технологическое оборудование.

Так как применение технологии частотного регулирования совместимо с любым типом электрооборудования, главной задачей работы

является выбор наиболее выгодного варианта электропривода для рассматриваемой технологии.

Потенциальными потребителями данного исследования являются высотные многоквартирные дома, расположенные на территории РФ, которые заинтересованы в увеличении энергоэффективности и производительности, при процессах подачи воды.

В нашем случае, для коммерческих организаций критерии сегментации могут быть: место нахождения; высота дома; кол-во квартир и другие.

Сегментирование рынка насосных станций будем проводить по следующим критериям:

- 1) Размер насосной станции, в качестве примера рассмотрим многоквартирные дома: ЖК «Дом на Мостфильмовском»; ЖК «Гагаринский»; ЖК «Прибрежный».
- 2) Тип электропривода (ЭП).

Таблица 8 – Карта сегментирования рынка

		Вид электропривода (ЭП)		
		ЭП переменного тока	ЭП АД с фазным ротором	ЭП с регулирование частоты
Размер компании	Крупная НС ЖК «Дом на Мостфильмовском»			
	Средняя НС ЖК «Гагаринский»			
	Мелкая НС ЖК «Прибрежный»			

Фирма А		Фирма Б		Фирма В	
---------	--	---------	--	---------	--

Для составления данной карты было взято три фирмы, которые занимаются производством электроприводов (Фирма А- ГЗ Электропривод, Фирма Б - АО "Тулаэлектропривод", Фирма В - ООО "БЗТпА"). В этом

примере сегментации карта показывает, какие ниши на рынке оборудования, не занятые конкурентами или где уровень конкуренции находится на минимальном уровне.

В результате сегментации:

- основные сегменты этого рынка включают в себя использование электропривода с частотным регулированием средних и малых предприятий;
- наиболее перспективным сегментом предложения является привод с частотным регулированием средних предприятий;
- сегмент рынка, которые являются привлекательными для компаний в будущем, является обеспечение частотно-регулируемого электропривода с небольшими динамическими, компаниями.

Преимуществами применения электроприводов с преобразователями частоты с использованием технологии частотно-регулирования на рынке насосных станций по сравнению с другими видами ЭП являются:

- более низкая стоимость;
- минимальные затраты на обслуживание;
- обеспечение требуемой степени защиты;

По данным на 2018 год, применение ЭП с преобразователем частоты в разных отраслях промышленности составляет около 45% на рынке электроэнергетики электротехники, что составляет большую часть среди разнообразия электроприводов.

### **6.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

С помощью данного анализа в научный проект вносятся коррективы, которые помогают успешно противостоять конкурентам. В ходе проведения анализа необходимо оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. Для этой цели используется вся имеющаяся информация о конкурентных разработках.

Анализ проводится с помощью оценочной карты. Оценочная карта



приведена в таблице 9.

Так как объектом исследования является электропривод установки с применением технологии частотного-регулирования, то сравнение будем делать на основе данных о двух электроприводах: электропривод переменного тока и регулируемый электропривод с частотным преобразователем, который является объектом исследования. Данный анализ позволяет выбрать тот вариант, который будет наиболее конкурентоспособным, а также определить в каком направлении необходимо действовать для его дальнейшего улучшения.

Таблица 9 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Пункты оценки	Значение критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>р.э.</sub>	Б <sub>н.э.</sub>	К <sub>р.э.</sub>	К <sub>н.э.</sub>
1	2	3	4	5	6
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>					
1. КПД	0,09	5	4	0,45	0,36
2. Плавность регулирования	0,1	4	2	0,4	0,2
3. Помехоустойчивость	0,17	2	3	0,34	0,51
4. Энергоэкономичность	0,15	5	1	0,75	0,15
5. Надежность	0,09	4	3	0,36	0,27
6. Уровень шума	0,08	5	3	0,40	0,24
7. Безопасность	0,12	4	4	0,48	0,48
<b>Экономические показатели оценки эффективности</b>					
1. Сервис	0,05	4	3	0,2	0,15
2. Цена	0,09	2	4	0,16	0,36
3. Конкурентоспособность продукта	0,04	4	2	0,18	0,08
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>3,72</b>	<b>2,8</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется следующим образом:

$$K = \sum B_i \cdot F_i \quad (6.1.1)$$

Где:  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Пример расчета:

$$K_{\phi} = \sum B_i \cdot B_{\phi} = 0,09 \cdot 5 + 0,1 \cdot 4 + \dots + 0,04 \cdot 4 = 3.72$$

Результаты показывают, что конкурентоспособность проекта составила 3.72, в то время как у нерегулируемого электропривода 2.8 соответственно. Отсюда следует, что исследуемая научная разработка, в основе которой лежит регулируемый электропривод для системы водоснабжения, является конкурентоспособной и имеет ряд преимуществ по техническим и экономическим показателям ресурсоэффективности, а значит заметно отличающимся высоким уровнем качества, в котором заинтересованы покупатели.

### 6.1.3 SWOT- анализ

SWOT – анализ проводят для того, чтобы исследовать внешнюю и внутреннюю среды проекта.

Проведение анализа осуществляется в несколько этапов:

- Описание сильных (**Strengths**) и слабых (**Weaknesses**) сторон проекта, выявление возможностей (**Opportunities**) и угроз (**Threats**), которые могут появиться во внешней среде проекта;
- Выявление соответствия внешним условиям среды сильных и слабых сторон исследовательского проекта;
- Составление итоговой матрицы SWOT-анализа.

SWOT-анализ проводим для исследования электропривода насоса системы водоснабжения.

Результаты SWOT-анализа представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны (S)</b> С1. Простота и удобство в эксплуатации; С2. Безопасность; С3. Низкие расходы; С4. Время исследования	<b>Слабые стороны (W)</b> Сл1. Результаты требуют экспериментального подтверждения; Сл2. Недостаточно информации о методе; Сл3. Не достаточная точность результатов на данном этапе исследования
<b>Возможности (О)</b> В1. Исследование образцов из разных материалов без затрат; В2. Отсутствие разрушения образца; В3. Государственная поддержка исследования; В4. Проведение исследований на любом компьютере	В1С3С4. Благодаря низким материальным и временным затратам, можно исследовать большой теоретический пласт информации для подбора наиболее подходящих характеристик и условий эксперимента;	В1Сл1. Благодаря Возможности проводить исследования для различных материалов, расширяется круг имеющихся экспериментальных данных, с которыми можно произвести сравнение;
	В3С1С2С3С4. Удобство в эксплуатации, безопасность, низкие материальные и временные затраты на исследование способствуют получению государственной поддержки; В4С1. За счет простоты и удобства в эксплуатации, исследования можно проводить на любом компьютере, без специального оборудования.	В1В4Сл2. За счет того, что исследования можно проводить для большого количества материалов и на любом компьютере, а информации о методе не достаточно, есть возможность публикации актуальных статей в научных журналах.
<b>Угрозы (Т)</b> У1. Возникновение конкурентов; У2. Технические сбои, которые могут повлечь за собой потерю наработанной информации	У1С3С4. За счет сокращения материальных и временных затрат на исследование, обеспечивается преимущество перед возможными конкурентными разработками; У2С1. Простая технология позволит достаточно быстро воссоздать утерянные результаты.	У1Сл1Сл3. Недостаточная Точность результатов, достигнутая на данном этапе исследования, может привести к опережающим активным исследованиям со стороны возможных конкурентов, но простота и доступность данного метода, помогут уменьшить риски.

Применение технологии частотного-регулирования в установках электропривода при перекачивании воды целесообразно. Достоинства

превосходят недостатки, к тому же имеются возможности по улучшению проекта.

## **6.2 Планирование научно-исследовательских работ**

### **6.2.1 Контрольные события проекта**

При организации проекта необходимо оптимально планировать сроки проведения работ. В таблице 11 определены ключевые события проекта, их даты и результаты.

Таблица 11 – Контрольные события проекта

<b>№ п/п</b>	<b>Контрольное событие</b>	<b>Дата</b>	<b>Результат (подтверждающий документ)</b>
1	Выбор направления исследований	20.10.2019	Отчет
2	Разработка технического задания	16.01.2020	Бланк задания
3	Разработка календарного плана	20.01.2020	Календарный план-график
4	Теоретические исследования	25.02.2020	Литературный обзор
5	Практические исследования и разработки	20.04.2020	Графики, расчеты
6	Обобщение и оценка результатов	06.05.2020	Отчёт о результатах исследований
7	Оформление расчетно-пояснительной записки	20.05.2020	Расчётно-пояснительная записка

### **6.2.1 Планирование НИР**

На данном этапе составляется полный перечень проводимых работ, определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом

планирования работ является календарный план, представленный в таблице 12.

Таблица 12 – Календарный план проекта

№	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Исполни тели
1	Составление и утверждение технического задания	2	16.01.2020	17.01.2020	НР
2	Разработка календарного плана	2	18.01.2020	19.01.2020	НР, И
3	Подбор и изучение литературных и патентных источников	15	20.01.2020	03.02.2020	И
4	Постановка задач исследования	5	04.02.2020	08.02.2020	И,НР
5	Подготовка методической части	7	09.02.2020	15.02.2020	И
6	Исследование технологии частотно-регулируемого электропривода насоса системы водоснабжения	9	16.02.2020	24.03.2020	И
7	Расчет математической модели установки	29	25.02.2020	25.03.2020	И, НР
8	Анализ режимов работы установки на основе полученных расчетов	15	26.03.2020	09.04.2020	И, НР
9	Выбор элементов электропривода	10	10.04.2020	19.04.2020	И
10	Разработка технической документации	11	20.04.2020	31.04.2020	И
11	Оценка экономической эффективности исследуемой технологии	12	01.04.2020	12.05.2020	И
12	Рассмотрение вопросов социальной ответственности	6	13.05.20	18.05.2020	И
13	Оформление пояснительной записки	7	19.05.2020	25.05.2020	И



Для иллюстрации календарного плана построим диаграмму Ганта, таблица 13– календарный план-график проведения работ с разбивкой по месяцам и декадам, где  – научный руководитель,  – исполнитель работ по проекту.

Таблица 13 – Календарный план-график проведения НИОКР по теме

№	Кол-во дней	Продолжительность выполнения работ														
		Январь			Февраль			Март			Апрель			Май		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	5															
2	5															
3	20															
4	6															
5	11															
6	12															
7	22															
8	9															
9	5															
10	4															
11	18															
12	14															
13	12															

### 6.3. Бюджет научного исследования

Так как данная научно-исследовательская работа была выполнена без специального оборудования и использования определенных материалов, в расчет бюджета НИР необходимо учитывать:

- затраты на амортизацию;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей;
- страховые взносы;
- накладные расходы.

#### 6.3.1 Основная заработная плата (компенсация трудовых затрат).

В этом разделе необходимо рассчитать основную заработную плату руководителя и проектировщика. Стоимость расходов на заработную плату определяется в зависимости от:

1. сложности работы;
2. существующей системы окладов и тарифных ставок.

Статья включает в себя: дополнительную заработную плату и основную заработную плату работников, включая премии, доплаты и т.д., непосредственно выполняющих НИР:

$$C_{\text{зн}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата (12÷20 % от  $Z_{\text{осн}}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя и исполнителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}};$$

$$Z_{\text{осн}} = 930,5 \cdot 128 = 119104 \text{ руб.},$$

где  $T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (из таблицы 9);  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{22100 \cdot 10,4}{247} = 930,5 \text{ руб.},$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot k_p = 17000 \cdot 1,3 = 22100 \text{ руб.},$$

где  $Z_{mc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для города Томска);  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней –  $M = 10,4$  месяца, 6- дневная неделя;  $F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно- технического персонала, раб. дн. (табл. 14).

Таблица 14 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: - выходные дни и праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени: - отпуск и невыходы по болезни	60	52
Действительный годовой фонд рабочего времени	239	247

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_{mc}$ , руб.	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель	35 000	1,3	45 000	1 979,9	53	104 935
Исполнитель	17 000	1,3	22 100	930,5	128	119 104
<b>Итого:</b>						224 039

### 6.3.2 Дополнительная заработная плата.

Данная статья включает сумму выплат, предусмотренных законодательством о труде, таких как: оплата отпусков, выплата вознаграждения за выслугу лет, отклонение от нормальных условий труда и



т.п.

Дополнительная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot k_{доп} = 104935 \cdot 0,15 = 15740 \text{ руб.},$$

$$Z_{доп} = Z_{осн} \cdot k_{доп} = 119104 \cdot 0,1 = 11910 \text{ руб.},$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным  $0,10 \div 0,15$ ).

В таблице 16 приведена форма расчета основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 16 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Исполнитель
Основная зарплата, руб.	104 935	119 104
Дополнительная зарплата, руб.	15 740	11 910
Зарплата, руб.	120 675	131 014
Итого по статье $C_{зн}$	251 689	

### 6.3.3 Отчисления на социальные нужды.

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}),$$

где  $k_{внеб}$  – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования, фонд социального страхования.)

-Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 17.

Таблица 17 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель проекта	104 935	15 740
Исполнитель	119 104	11 910
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
Отчисления во внебюджетные фонды		
Руководитель	32 703	
Исполнитель	35 504	
Итого по статье <i>С<sub>внеб</sub></i>	68 207	

#### 6.3.4 Прочие расходы.

Расчет стоимости материальных затрат на прочие расходы производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В их стоимость включают транспортно-заготовительные расходы, которые составляют 3÷5% от цены. В эту же статью включаются затраты на оформление документации. Результаты по данной статье представлены в таблице 18.

Таблица 18 – Сырье, материалы, комплектующие изделия и покупные материалы

Наименование	Марка	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага для принтера формата А4	Снегурочка, 500 листов	1	268	268
Тетрадь	BIC	2	50	100
Ручка шариковая	Paper Mate	2	80	160
Скоросшиватели	-	1	30	30
Степлер	ErichKrause	1	300	300
<b>Всего за материалы</b>				<b>858</b>
<b>Транспортно-заготовительные расходы (3÷5%)</b>				<b>43</b>
<b>Итого по статье <math>C_{пр}</math></b>				<b>901</b>

### 6.3.5 Накладные расходы.

Затраты организации: печать и копии материалов исследований, оплата электроэнергии, оплата услуг связи и интернета и тд., - не попавшие в предыдущие статьи расходов, являются накладными расходами. Их размер определяет с помощью следующей формулы ( $k_{нр}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы, принят 15%):

$$C_{накл} = (З_{осн} + З_{доп}) \cdot k_{накл} = 251689 \cdot 0,15 = 37753 \text{ руб.},$$

### 6.3.6 Амортизация

В данном пункте будет рассчитана амортизация ноутбука, необходимого в работе над проектом.

Пусть срок эксплуатации ноутбука 3 года. Отсюда следует, что норма амортизации за месяц равна:

$$K = \frac{1}{n} \cdot 100\%$$

$$K = \frac{1}{3} \cdot 100\% = 33\%$$

где:  $n$  – срок полезного использования в годах.

Амортизация будет равна:

$$A = \frac{K \cdot И}{12 \cdot 30} \cdot m_p$$

$$A = \frac{0,33 \cdot 40}{12 \cdot 30} \cdot 75 = 2750 \text{ руб.}$$

где:  $И$  – итоговая сумма в тыс. руб.;

$m$  – время использования в днях.

### 6.3.7 Полная смета затрат

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ. Полная смета затрат приведена в таблице 19.

Таблица 19 – Полная смета затрат

Наименование статьи	Затраты, руб.
1. Заработная плата	251 689
2. Отчисления во внебюджетные фонды	68 207
3. Прочие расходы	901
4. Накладные расходы	3753
5. Амортизация	2750
<b>Бюджет проекта</b>	<b>361 300</b>

Таким образом, в этом разделе работы проведено технико-экономическое исследование:

- составлена структура работы и на ее основе проведены расчеты сложности НИР, а также ее бюджет;
- рассчитан бюджет затрат НИР, который составил 361300 рублей.

#### **6.4 Определение ресурсной и экономической эффективности исследования**

Ресурсоэффективность – это интегральный критерий ресурсоэффективности и определяется по формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i$$

где:  $I_{pi}$  - интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  - весовой коэффициент проекта;

$b_i$  - бальная оценка проекта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 20 - Ресурсоэффективность

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки
1. Безопасность	0,15	4
2. Надежность	0,2	4
3. Удобство в эксплуатации	0,2	5
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	4
5. Энергоэкономичность	0,25	5
Итого:	1	22

Тогда интегральный показатель ресурсоэффективности для нашего проекта равен:

$$I_{pi} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 5 = 4,45$$

В данном пункте мы провели оценку ресурсоэффективности исследуемого проекта, в результате получили оценку (4,45 из 5), что говорит об эффективности его реализации.

Оценить экономическую эффективность предлагаемого решения - крайне сложная задача, потому что, потребитель не имеет на данный момент аналогов применения электропривода установки с применением технологии частотного-регулирования.

Таким образом, регулируемый электропривод с преобразователем частоты сейчас остается эффективным, и продолжается развиваться в таких направлениях как, улучшение энергетических, и эксплуатационных характеристик. Благодаря ускоренному развитию силовой полупроводниковой преобразовательной техники, открылись новые возможности применения регулируемого электропривода в реструктуризации производства, или в тех производственных процессах, где ранее использовались нерегулируемые электроприводы или применение других типов электропривода было нецелесообразно.

В данной работе была поставлена цель, которая предполагала решение определенных задач. В итоге можно сделать следующие выводы:

- 1) С помощью карты сегментирования была проанализирована перспективность применения технологии частотного-регулирования в установках электропривода системы водоснабжения;
- 2) С помощью анализа конкурентных технических решений был выбран регулируемый электропривод с частотным преобразователем, при сравнении его с нерегулируемым электроприводом, так как он оказался наиболее предпочтительным вариантом по итогам расчетов.
- 3) Оценив факторы, влияющие на проект, с помощью SWOT- анализа был сделан вывод о целесообразности осуществления проекта применением технологии частотного-регулирования;
- 4) Был составлен календарный план – график выполнения работы каждого из участников: научного руководителя и инженера-дипломника.
- 5) Рассчитан бюджет НИР, который необходим для осуществления данного проекта. Он составил 361300 рублей. руб.;
- 6) Интегральный показатель ресурсоэффективности, равен 4,45 по 5 – бальной шкале. Такой результат говорит о том, что данный проект будет эффективным.

По итогам раздела было установлено, что проект отвечает необходимым требованиям в области ресурсоэффективности. Является конкурентоспособным и привлекательным с экономической точки зрения.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5AM87	Мауреру Вячеславу Евгеньевич

Школа		Отделение (НОЦ)	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электропривод общепромышленных механизмов и технологических комплексов

Тема ВКР: Частотно-регулируемый асинхронный электропривод насоса системы водоснабжения.

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Асинхронный электропривод преобразуют электрическую энергию в механическую энергию.</i>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>— специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>— организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>- ГОСТ 12.2.061-81. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.</p> <p>- ГОСТ 12.2.032-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»</p> <p>- ГОСТ 12.2.033-78. «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования»</p> <p>- Ст. 305 Трудового кодекса РФ</p>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p><b>Выявленные вредные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— отклонение показателей микроклимата</li> <li>— превышение уровня шума</li> <li>— отсутствие или недостаток естественного света</li> <li>— недостаточная освещенность рабочей зоны</li> </ul> <p><b>Выявленные опасные факторы:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— Электромагнитные излучения</li> <li>— Поражение электрическим током;</li> </ul>

<b>3. Экологическая безопасность:</b>	Область воздействия на литосферу — большие по площади затенения земель  — утечка низкокипящих жидкостей
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	— пожары и взрывы;

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	<b>20.03.2020</b>
--	-------------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Фех Алина Ильдаровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Маурер Вячеслав Евгеньевич		



## **7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

В настоящей выпускной квалификационной работе ведется моделирование установки электропривода насоса системы водоснабжения. Модернизация и разработка научных основ новых (имитационных) методов исследования для обеспечения: технологической безопасности и отсутствия побочных явлений в процессах перекачки воды, является актуальной в наше время.

Численное моделирование режим работы насоса водоснабжения применяется в научных лабораториях и исследовательских институтах и позволяет получить необходимые теоретические сведения для проведения экспериментов по повышению производительности установки, которая в дальнейшем может быть использована во многоэтажных сооружениях.

Моделирование осуществлялось на персональном компьютере (ПК). Рабочая зона – аудитория 228, 8-го корпуса НИ ТПУ, оборудованная системами отопления, пожарной и охранной сигнализации. В аудитории имеются источники естественного и искусственного освещения. Рабочее место – стационарное, оборудованное ПК.

### **7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

К нормативным актам, регулирующим вопросы охраны труда, в первую очередь относится Трудовой кодекс Российской Федерации [19].

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагаются на работодателя (статья 212 «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. от 01.04.2019)) [20].

Нормативная продолжительность рабочего времени согласно статье 91 Трудового кодекса РФ [19] не может превышать 40 часов в неделю.

Согласно статье 111 Трудового кодекса РФ [19] работникам необходимо предоставить один выходной день при шестидневном рабочем графике.

В соответствии с Приложением 7, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [21] виды трудовой деятельности разделяются на 3 группы: группа А - работа по считыванию информации с экрана ВДТ (видеодисплейный терминал) с предварительным запросом; группа Б - работа по вводу информации; группа В - творческая работа в режиме диалога с ПК.

При выполнении в течение рабочей смены работ, относящихся к разным видам трудовой деятельности, за основную работу с ПК следует принимать такую, которая занимает не менее 50% времени в течение рабочей смены или рабочего дня.

Таблица 21 – Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида и категории трудовой деятельности с ПК[21]

Категория работы с ПК	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПК			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	группа А, количество знаков	группа Б, количество знаков	группа В, ч	при 8-часовой смене	при 12-часовой смене
I	до 20 000	до 15 000	до 2	50	80
II	до 40 000	до 30 000	до 4	70	110
III	до 60 000	до 40 000	до 6	90	140

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 [22] конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления, средства отображения информации и т.д.) должны соответствовать антропометрическим, физиологическим и психологическим требованиям, а также характеру работы.

Общие требования к организации рабочих мест пользователей К приведены в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [21].

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5-0,7. Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК. Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

## **7.2 Производственная безопасность**

В данном разделе рассматривается рабочая зона – аудитория 228, находящаяся в 8 корпусе ТПУ.

В аудитории расположено: 2 ПК, система охраны и сигнализации, маршрутизатор локальной сети (LAN), розетки и проводка сети АС 220 В, освещение.

Составим обобщающую таблицу «Возможные опасные и вредные факторы» (таблица 22), которая необходима для целостного представления обо всех характерных для рабочего места вредных и опасных факторах, связи их с запроектированными видами работ.

Для идентификации потенциальных опасных и вредных факторов используем ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [23].

**Таблица 22 – Возможные опасные и вредные факторы [5]**

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка модели	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [6]
2. Повышенный уровень шума на рабочем месте	+	+	+	ГОСТ 12.1.003–2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [8] ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация[7]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	+	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [8]
4. Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
5. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	Правила устройств электроустановок - 7-е изд. - М.: Энергоатомиздат, 2001-640с. [9]

### **7.2.1 Анализ вредных и опасных факторов производственной среды**

#### **Отклонение показателей микроклимата**

Высокая температура воздуха способствует быстрой утомляемости работающего, может привести к перегреву организма, тепловому удару. Низкая температура воздуха может вызвать местное или общее охлаждение организма, стать причиной простудного заболевания либо обморожения. Высокая относительная влажность при высокой температуре воздуха способствует перегреванию организма, при низкой же температуре увеличивается теплоотдача с поверхности кожи, что ведет к переохлаждению.

Санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения, в соответствии с

«СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [24].

Таблица 23 – Оптимальные величины показателей микроклимата [24]

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia* (до 139)	22 - 24	60 - 40	0,1
Теплый	Ia* (до 139)	23 - 25	60 - 40	0,1

\* К категории Ia относятся работы с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением

Таблица 24 – Допустимые величины показателей микроклимата [24]

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	20,0-25,0	15-75	0,1
Теплый	Ia (до 139)	21,0-28,0	15-75	0,1-0,2

Таблица 25 – Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тел работающих от производственных источников [24]

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/м <sup>2</sup> , не более
50 и более	35
25-50	70
Не более 25	100

При наличии теплового облучения работающих температура воздуха на рабочих местах не должна превышать 25°С - при категории работ Ia [24].

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата используется: механизация и автоматизация технологических процессов; устройство систем вентиляции, системы местного кондиционирования воздуха и отопления; установка регламента времени работы [25].

## Повышенный уровень шума на рабочем месте

Источником возникновения шума в аудитории 228 являются 2 ПК (процессор, охлаждение внутри системного блока, оптические приводы, DVD-ROM).

Длительное воздействие повышенного шума на рабочем месте способно привести к развитию у работника потери слуха, увеличению риска артериальной гипертензии, болезней сердечно-сосудистой, нервной системы и др. [26].

Таблица 26 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПК [27]

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни и эквивалентные уровни звука, дБ
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творческая деятельность, руководящая работа с повышенными требованиями, научная деятельность, конструирование и программирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Уровень шума блока питания компьютера составляет примерно 5–10 дБА, уровень шума охлаждающего устройства процессора 15–20 дБА, а остальные элементы охлаждения имеют незначительный уровень шума, поэтому их можно не учитывать.

Для защиты от шума согласно «ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация» [28] применяется рациональное размещение оборудования.

## Недостаточная освещенность рабочей зоны

В аудитории 228 предусматривается естественное (окно) и искусственное освещение.

Неудовлетворительное в количественном или качественном отношении освещение не только утомляет зрение, но и вызывает утомление организма в целом. Нерационально организованное освещение может, кроме того явиться причиной травматизма. Вредной для человека является как недостаточная освещенность, так и чрезмерная.

Общее освещение при использовании люминесцентных светильников следует выполнять в виде сплошных или прерывистых линий светильников, расположенных сбоку от рабочих мест, параллельно линии зрения пользователя при рядом расположении видеодисплейных терминалов [21].

СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* [29] – определяет нормы освещенности.

Таблица 27 – Нормативные показатели освещения основных помещений общественных, жилых и вспомогательных зданий [29]

Плоскость (Г-горизонтальная, В-вертикальная) нормирования освещенности и КЕО	Разряд и подразряд зрительно й работы	Искусственное освещение		Естественное освещение		Совмещенное освещение	
		Освещенность, лк		КЕО* $\epsilon_n$ , %			
		при системе комбинированного освещения	при системе общего освещения	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении
В-1,2 – на экране дисплея	Б-2	-	200	-	-	-	-
Г-0,8 – на рабочих столах	А-2	500/300	400	3,5	1,2	2,1	0,7

Таблица 28 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК[21]

Освещенность на рабочем столе:	300-500 лк
Освещенность на экране ПК:	не выше 300лк
Блики на экране:	не выше 40 кд/м <sup>2</sup>
Прямая блескость источника света:	200 кд/м <sup>2</sup>
Показатель ослепленности:	не более 20
Показатель дискомфорта:	не более 15
Отношение яркости	
- между рабочими поверхностями:	3:1-5:1
- между поверхностями стен и оборудования:	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%.

Рабочее место соответствует нормам, кратко обозначенным в таблице 7.8.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях с ПК следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

### **Повышенный уровень электромагнитных излучений**

В аудитории 228 расположено: 2 ПК, система охраны и сигнализации, маршрутизатор локальной сети (LAN), розетки и проводка сети АС 220 В, освещение

Источники ЭМ полей (излучения): 1. Монитор персонального компьютера; 2. Системный блок ПК; 3. Электрооборудование (сетевые фильтры, люминесцентные лампы, проводка, розетки, выключатели, система охраны и сигнализации); 4. Различные периферийные устройства (клавиатура, мышь); 5. Соседние ПК.

Мероприятия по снижению электромагнитного излучения:

1. Заземление аппаратуры;
2. Оптимальная расстановка рабочих мест;
3. Удаленность расположения электрооборудования;
4. Использование ЖК-экранов, на которых не образуется статического потенциала;
5. Экранирование электроники корпусом. Для снижения влияния внешних излучений и для снижения выхода собственных излучений во внешнюю среду;
6. Использование сетевых фильтров, для снижения влияния кондуктивных помех (которые передаются по проводам);
7. Гальваническая развязка (система питания компонентов соединена звездой).

Система охраны получает питание постоянным током 10-25 В. Световая и звуковая сигнализация 12 В. Как источником помех ими можно пренебречь.

Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК приведены в таблице 29.



Таблица 29 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ЭВМ [3]

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Организационные мероприятия: выбор рациональных режимов работы оборудования, соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП, ограничение места и времени нахождения персонала в зоне воздействия ЭМП.

### **Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека**

Основными причинами воздействия тока на человека являются: появление напряжения на металлических частях оборудования в результате повреждения изоляции, ошибочно поданное напряжение на рабочее место; отсутствие заземления, замыкание в результате аварии.

Электрический ток, протекая через тело человека, производит термическое, электролитическое, биологическое, механическое действие. Термическое действие характеризуется нагревом кожи, тканей вплоть до ожогов. Электролитическое действие заключается в разложении жидкостей, в изменении их состава и свойств. Биологическое действие проявляется в нарушении биологических процессов, протекающих в организме человека. Механическое действие приводит к разрыву тканей в результате электродинамического эффекта [25].

Электрические установки, к которым относятся ЭВМ, представляют для человека большую потенциальную опасность. В процессе эксплуатации или при проведении профилактических работ человек может коснуться частей, находящихся под напряжением.

Согласно классификации помещений по опасности поражения электрическим током ВКР разрабатывался в помещении без повышенной

опасности (ПУЭ) [30], характеризующимся наличием следующих условий: напряжение питающей сети 220 В, частота 50 Гц; относительная влажность воздуха не более 75 %; средняя температура не более 35 °С.

При нормальном режиме работы оборудования опасность электропоражения невелика, однако, возможны режимы, называемые аварийными, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящихся под напряжением с заземленными конструкциями.

Основными техническими способами и средствами защиты от поражения электрическим током являются: защитное зануление; выравнивание потенциалов; защитное заземление; электрическое разделение сети; изоляция токоведущих частей; оградительные устройства и другое.

К средствам защиты от повышенного уровня статического электричества относятся: заземляющие устройства; нейтрализаторы; увлажняющие устройства; антиэлектростатические вещества.

### **Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов на исследователя**

Рабочая зона – аудитория 228, 8-го корпуса ИШЭ ТПУ, оборудованная системами отопления, пожарной и охранной сигнализации. В аудитории имеются источники естественного и искусственного освещения. Рабочее место – стационарное, оборудованное ПК.

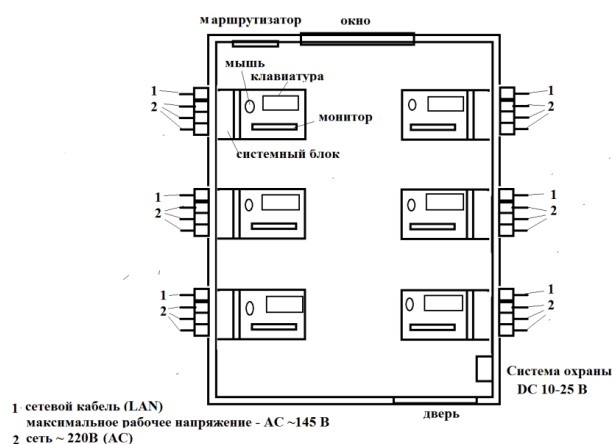


Рисунок 53 – План аудитории 228

Для поддержания нормальных параметров микроклимата в рабочей зоне применяются следующие основные мероприятия: устройство систем вентиляции; кондиционирование воздуха и отопление. Кроме того, большое значение имеет правильная организация труда и отдыха работников.

Нормируемые уровни шума обеспечиваются путем использования малошумного оборудования, применением звукопоглощающих материалов (например, пластмассы), рациональным размещением оборудования, проведением периодического контроля шума на рабочих местах.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях с ПК проводится чистка стекол, оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводится своевременная замена перегоревших ламп. Рабочий стол рекомендуется устанавливать таким образом, чтобы световой поток был направлен слева от работника.

### **7.3 Экологическая безопасность**

#### **Влияние объекта исследования на окружающую среду**

Каждый ПК содержит не только ценные цветные металлы, но и целый набор опасных для окружающей среды веществ. Это производные газов, тяжелые металлы, среди которых кадмий, ртуть и свинец. Попадая на свалку, все эти вещества под воздействием внешней среды постепенно проникают в почву, отравляют воздух и воду.

Также в процессе утилизации из техники извлекаются и материалы, которые могут быть использованы для вторичной переработки.

Техника, подвергаясь процессу утилизации, проходит специальную процедуру: непосредственный процесс переработки; отправку некоторых частей оргтехники на аффинаж (это металлургический процесс изъятия высокочистых благородных металлов при отделении от них загрязняющих примесей, один из видов извлечения металлов). Полную процедуру утилизации офисной техники могут осуществлять только специализированные зарегистрированные предприятия.

Отходы, содержащие в себе части цветных металлов, относятся к категории металлолома и попадают под соответствующий регламент ГОСТ Р 54565-2011 [31].

ЖК-экраны один из источников парниковых газов, которые намного вреднее диоксида углерода.

К воздействию на литосферу можно отнести и образование отходов в виде использованной бумаги. Бумага используется в процессе проведения всей научной работы и требуется в больших количествах. После использования, бумага выносится в специальные контейнеры, предназначенные для сбора макулатуры на переработку для вторичного использования. Вторсырье, находящееся в специальных контейнерах отвозится на склад компании, на складе весь собранный материал преобразовывается: сортируется по типу и цвету, измельчается и превращается в полуфабрикат. Утилизируется бумага на специальных предприятиях, которые занимаются переработкой макулатуры.

Методы обеспечения экологической безопасности: совершенствование технологических процессов и разработка новой техники с меньшим уровнем негативного воздействия на окружающую среду; вовлечение образовавшихся отходов во вторичное производство.

#### **7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее вероятная ЧС: пожар.

Вопросы обеспечения пожарной безопасности производственных зданий и сооружений имеют большое значение и регламентируются специальными государственными постановлениями и указами ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда «Пожарная безопасность. Общие требования» (ред. от 12.09.2018) [32].

В соответствии с «НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» аудитория 228, 8го корпуса ТПУ относится к категории «В4», так как в

аудитории находятся твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы [33].

Источниками возникновения пожара могут быть электрические схемы от ЭВМ, устройства электропитания, кондиционирования воздуха. В данных объектах по некоторым причинам (снижение сопротивления изоляции, ослабление контактов, перегрузка сетей, короткое замыкание) возникает перегрев элементов, что приводит к появлению искр и возгоранию.

Горючие компоненты в помещении – строительные материалы для акустической и эстетической отделки помещений, перегородки, двери, полы, перфокарты и перфоленты, изоляция кабелей и др.

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. В рабочей зоне размещены таблички с указанием номера телефона вызова пожарной охраны, кроме того, размещен схематичный план эвакуации людей при пожаре; дополнительно разработана инструкция, определяющая действия персонала в случае возникновения очага возгорания.

На рисунке 54 приведен план эвакуации людей в случае возникновения ЧС. Работы проводятся в аудитории 228.



Рисунок 54 – План эвакуации аудитории 228

В аудитории находится памятка о соблюдении правил пожарной безопасности.

В целях обеспечения пожарной безопасности ЗАПРЕЩЕНО: курить; пользоваться неисправными электронагревательными приборами; использовать временную электропроводку и/или удлинители для питания электроприборов; перегружать электрическую сеть; скручивать, завязывать электрические провода; накрывать горючими материалами включенные электрические лампы; закрывать датчики пожарной сигнализации посторонними предметами. Нельзя загромождать пути эвакуации.

Необходимо знать: порядок эвакуации; место нахождения первичных средств пожаротушения.

Помещение оснащено первичными средствами пожаротушения: огнетушители и системой пожарной сигнализации.

В случае пожара звонить по телефону 01, 101, 112: назвать точный адрес; оповестить всех о случившемся; организовать эвакуацию граждан, документов и материальных ценностей; принять меры к ликвидации пожара.

В случае возникновения пожара, необходимо предпринять следующие меры: обесточить помещение, вызвать службу пожарной охраны. Если горит электроприбор (ПК) – накрыть его асбестовым одеялом или другим плотным материалом и дождаться прекращения горения из-за отсутствия доступа кислорода. Затем воспользоваться порошковым огнетушителем.

### **Вывод по разделу**

Проанализировав условия труда на рабочем месте, где была разработана магистерская диссертация, можно сделать вывод, что компьютерный класс удовлетворяет необходимым нормам и в случае соблюдения техники безопасности и правил пользования компьютером работа в данном помещении не приведет к ухудшению здоровья работника.

Само помещение и рабочее место в нем удовлетворяет всем нормативным требованиям. Кроме того, действие вредных и опасных факторов сведено к минимуму. Деятельность, осуществляемая в помещении,

не представляет опасности окружающей среде.

### Заключение

В результате работы над диссертацией были исследованы технологический процесс поддержания давления воды, насосные станции и основные их характеристики. Также была создана имитационная модель асинхронного ЭП насоса с учётом особенностей нагрузки; разработана система управления асинхронным ЭП насоса.

Были исследованы принципы скалярного управления асинхронными двигателями. На основе закона сформулированного Костенко М.П. были рассчитаны и построены механические и электромеханические характеристики АД для закона  $\frac{U_1}{f_1^2} = const$  для режима без компенсации и с  $IR$ -компенсацией.

Системы скалярного управления имеют очень много преимуществ перед другими системами: простота, надёжность, требуется минимум информации о двигателе, и нет необходимости в использовании датчиков скорости и положения ротора.

Также была исследована система автоматического поддержания давления воды. Для получения поддержания постоянного давления в системе была заведена обратная связь по давлению.

В заключении хотелось бы отметить, что зачастую лица принимающие решения по модернизации оборудования, изучив стоимость внедрения преобразователей частоты, откладывают решение в долгий ящик, не осознавая долгосрочную выгоду проекта в целом. В действительности, каждое внедрение требует экономической оценки. И, безусловно, большинство компетентных инженеров в состоянии провести соответствующее технико-экономическое исследование. Тем более что рынок преобразователей достаточно насыщен и имеет широкий горизонт

цен, в зависимости от функциональности и марки устройства. Доказано, что применение преобразователей частоты на насосных станциях позволяет:

- экономить электроэнергию, за счет организации работы электропривода в зависимости от реального потребления воды (эффект экономии 20-50%);
- снизить расход воды, за счет снижения утечек, возникающих при повышенном давлении в магистрали, когда водопотребление в действительности невелико (в среднем на 5%);
- уменьшить затраты на плановый и капитальный ремонт сооружений и оборудования (всей инфраструктуры подачи воды), в результате пресечения аварийных ситуаций, вызванных в частности гидравлическим ударом, который нередко происходит в случае использования нерегулируемого электропривода). Ресурс службы оборудования повышается минимум в 1,5 раза);
- снизить фонд заработной платы обслуживающего и дежурного персонала за счет комплексной автоматизации систем водоснабжения;
- достичь определенной экономии тепла в системах горячего водоснабжения за счет снижения потерь воды, несущей тепло;
- при необходимости сделать напор выше обычного.



### Список используемых источников.

1. Медведев Г.Г., Дорохов А.Р. Введение в курс Насосы, вентиляторы, компрессоры. – Конспект лекций. Томск: Изд. ТПУ, 1998. – 64 с.
2. URL: <http://www.engineerproject.ru/vodosnabzhenie/> (дата обращения: 20.02.2010)
3. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с., ил.
4. URL: <http://www.privod.ru//> (дата обращения: 20.02.2010)
5. Удут Л. С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 1. – Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. – Оптимизация контура регулирования: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 144 с.
6. URL: <http://www.asu-tech.ru/> (дата обращения: 18.05.10)
7. Эпштейн И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1982.
8. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Расчёт характеристик электроприводов переменного тока. Ч.1. Асинхронный двигатель: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136 с.
9. URL: <http://www.intechnics.ru> (дата обращения: 20.11.2010)
10. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения машины по каталожным данным. // Электричество. – 1998. – №4. – С. 38 – 42.
11. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1966. – 300 с.
12. Насосы. Вентиляторы. Кондиционеры: Справочник/Е.М. Росляков, Н.В. Коченков, И.В. Золотухин др., Под редакцией Е.М. Росляков – СПб.: Политехника, 2006. – 822с.

13. Семидуберский М.С. насосы, компрессоры, вентиляторы. Учебник для техникумов. Изд. 4-е перераб. и доп. М., «Высшая школа», 1974 – 232с.
14. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор)/ Л.Х. Дацковский, Б.И. Абрамов и др.// Электротехника 1996. - №10. - С. 18-28.
15. URL: <http://www.aekc.ru/> (дата обращения: 20.02.2011)
16. М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В. М. Терехов, А.В. Шинянский Основы автоматизированного электропривода. Учеб. Пособие для вузов. М., «Энергия», 1974. – 568 с.
17. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М., «Энергия», 1972. – 240 с.
18. В.И. Ключев «Теория электропривода», М: Энергоиздат, 1998.
19. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. М., «Энергия», 1972. – 240 с.
20. Статья 212 «Трудового кодекса Российской Федерации» от 30.12.2001 № 197-ФЗ (ред. От 01.04.2019).
21. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы (рад. От 21.06.2016).
22. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
23. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ. Опасны и вредные производственные факторы. Классификация.
24. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
25. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие/ О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е

изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.

26. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.

27. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

28. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Классификация.

29. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\*

30. Правила устройств электроустановок – 7-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 2001-640с.

31. ГОСТ Р 54565-2001 Лом и отходы цветных металлов и сплавов. Термины и определения.

32. ГОСТ 12.1.004-91 Система стандартов безопасности труда «Пожарная безопасность. Общие требования» (ред. От12.09.2018).

33. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

## Приложение А

(справочное)

### FREQUENCY CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE PUMP WATER SYSTEM

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5AM87	Маурер Вячеслав Евгеньевич		

Консультант кафедры ОЭЭ :

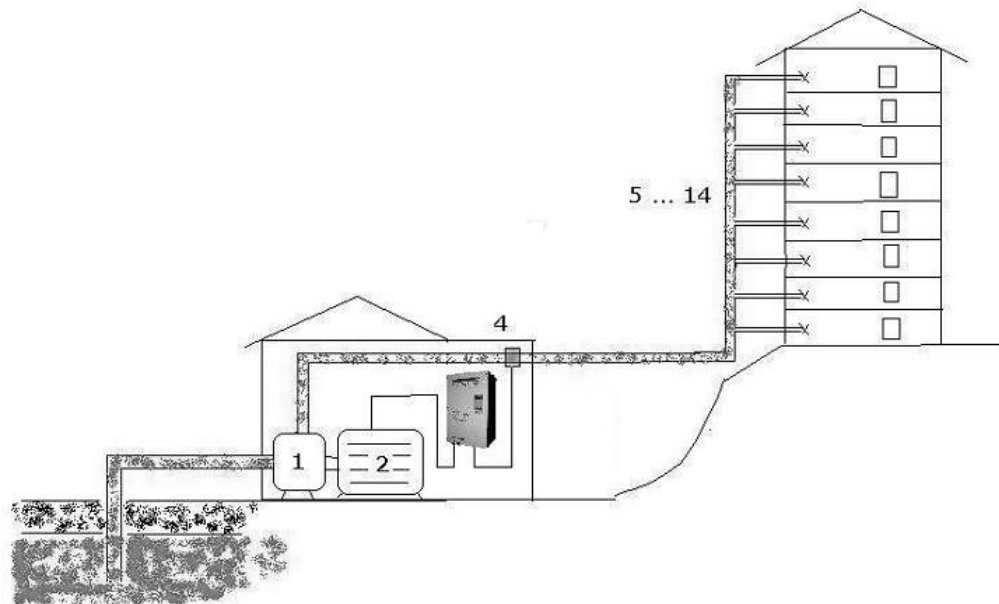
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н. В.	К.Т.Н		

Консультант – лингвист кафедры ОИЯ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качалов Н.А.	К.П.Н		

## 1. The technological process of automatically maintaining water pressure in the water system

### 1.1 Description of the process



Picture 1 - Process flow chart

The water supply system consists of a pump 1, driven by an electric motor 2. The pump and electric motor are located in the building of the pumping station. Frequency converter 3 controls the electric motor. The pressure in the water supply network is measured by a pressure sensor 4, the feedback signal from which is fed to the inverter. The set pressure value is set on the inverter control panel.

During the day, the water flow  $Q$  varies significantly (taps 5-14 open and close). The maximum (peak) water flow occurs in the morning and evening hours, while at night the flow rate is almost zero and during the day is also small. If the actual water pressure in the water supply network at some flow rate differs from the set one, then the frequency converter smoothly changes the speed of rotation of the motor and pump so that at a different flow rate (consumption) the pressure in the network is ensured. Thus, the pressure on the valves is kept constant.

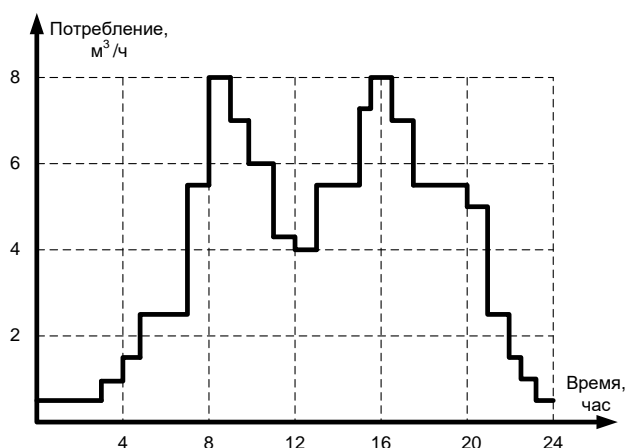
The advantages of using inverters while maintaining a given pressure:

- reduction of electricity consumption,

- the exclusion of water hammer in the network and, as a consequence, the reduction in the number of accidents on pipelines,

- elimination of shock loads on the electrical network at startup electric drive.

An approximate daily water consumption schedule is presented in Picture 2.



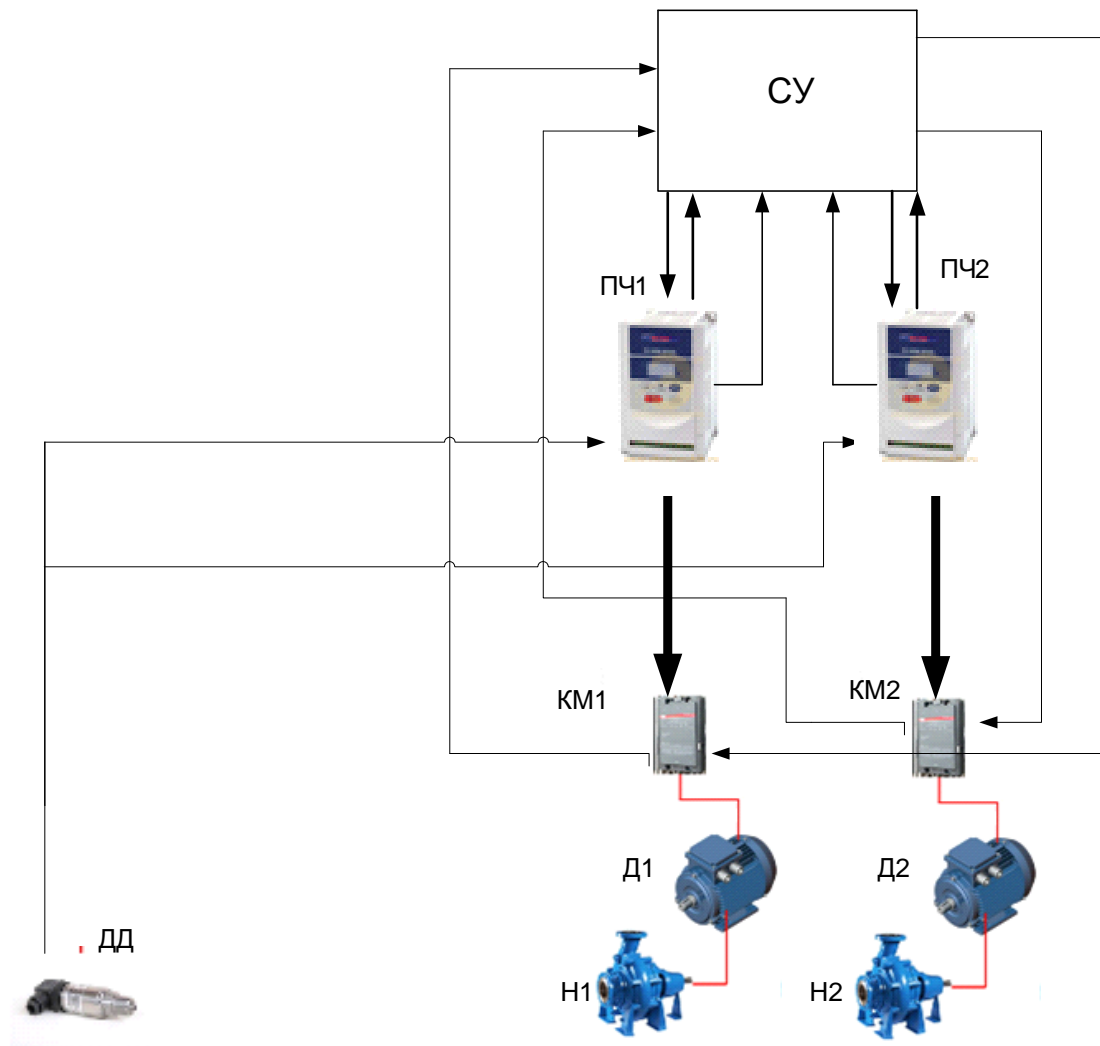
Picture 2 - Schedule of water consumption

The infinitely variable performance control is used, as a rule, only for one of the pump units available in the installation. If the regulation range is insufficient (for example, the capacity of the adjustable engine increases to the maximum, but this still does not lead to the desired increase in pressure), the number of pumping units included in the operation changes (an additional pumping unit is turned on, and the capacity of the adjustable one starts to increase smoothly again).

The use of an adjustable asynchronous electric drive for controlling pumping units can provide:

- smooth start of the electric motor, lack of mechanical loads on the motor and inrush currents in the network;
- lack of water hammer;
- efficient use of power consumed by the pump unit in the entire control range;
- ensuring the power factor of the pump motor at a value close to 1.0;

- noise reduction during start-up and operation;
- ensuring the autonomous and safe operation, integration into industrial control systems.



Picture 3 - Block diagram of the automated process control system of the pumping station

SU - Management System; IF - Converter; KM - Contactor; D - Engine; H - Pump; DD - Pressure Sensor.

By functional purpose, process control is divided into three levels:

1. The upper level is the automated workplace of the operator on the basis of the pump control panel (PUN);

2. Middle level - the implementation of the processing of information from the lower level measuring system and the formation of a control signal for actuators (including automation actuators);

3. The lower level is an executive electric drive, which is part of the technological equipment.

At the upper level, the control system produces a technological task for the movement of the working bodies of a separate technical installation or an entire technological system.

The middle level provides the programmed movement of executive drives, the movement along a predetermined path in the space of controlled variables.

At the lower level, technological equipment that is directly involved in the technological process and the space of controlled and controlled variables of technological equipment are determined.

## **1.2 Basic information about pumping stations**

The main consumers of electricity in our country are manufacturing enterprises and utilities. Most of the electricity consumed by electric pumps and fans. The cost of electricity in the total amount of operating costs at the water supply and sewer enterprises in the case of surface water is 40-50%. According to statistics, in the process of pumping clean and wastewater, 5-15% of energy is wasted. In some cases, this indicator rises to 20–50%.

A pump unit is an electric pump and gear. Together with the equipment ensuring its operation in the required mode, it forms a pumping unit. The structure, which includes one or more pumping units and auxiliary systems that ensure the operability of the facility as a whole, is called a pumping station.

Pumping water supply stations, depending on the place occupied in the general water supply system, are divided into stations of the 1st, 2nd, 3rd and subsequent elevations and sewer.



## **2. Description of the pumps and features of work**

### **2.1 Generals**

Pumps are called machines that serve for pumping and creating a pressure head of liquids of all kinds, a mechanical mixture of liquids with solid and colloidal substances and gases. It should be noted that machines for pumping and creating ahead of gases (gaseous liquids) are allocated in separate groups and are called fans and compressors.

Pumping units (pumps) are used in all industries, agriculture and municipal services, in transport and for domestic purposes. Pumps belong to the class of energy machines in which the mechanical energy of the drive is converted into the energy of the fluid flow (including with a certain percentage of solid inclusions).

According to the principle of action, pumps are divided into two main groups: dynamic and volumetric.

The dynamic units include pumping units, where the fluid, under the influence of hydrodynamic forces, moves in a chamber constantly in communication with the pump inlet and outlet.

In volumetric - the movement of the working medium is carried out under the influence of surface pressure with a periodic change in the volume of the pump chamber alternately communicating with the inlet and outlet of the pump.

The dynamic group includes: vane (centrifugal and axial pumps), friction pumps (vortex, disk, and worm hydro-jet), and inertial (vibration).

Volumetric pumps include - reciprocating pumps (piston, plunger), as well as rotary (gear and screw).

Centrifugal pumps are classified by:

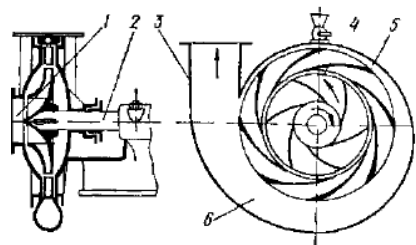
1) the number of wheels (unicycle); in addition, single-wheel pumps perform with a cantilever shaft arrangement - cantilever;

2) pressure (low pressure up to 2 kgf / cm<sup>2</sup> (0.2 MN / m<sup>2</sup>), average pressure from 2 to 6 kgf / cm<sup>2</sup> (0.2 to 0.6 MN / m<sup>2</sup>), higher pressure more than 6 kgf / cm<sup>2</sup> (0.6 MN / m<sup>2</sup>));

- 3) the method of supplying water to the impeller (with one-way water inlet to the impeller, with two-way water inlet (double suction));
- 4) the location of the shaft (horizontal, vertical);
- 5) the housing connector method (with a horizontal housing connector, with a vertical housing connector);
- 6) a method for draining liquid from the impeller into the spiral channel of the housing (spiral and turbine). In scroll pumps, fluid is drawn directly into the scroll channel; in a turbine fluid, before it enters the spiral channel, it passes through a special device - a guiding device (a fixed wheel with blades);
- 7) the degree of the high-speed impeller (low-speed, normal, high-speed);
- 8) the type of pumped liquid (plumbing, sewage, acid and alkaline, oil, dredging, etc.);
- 9) the method of connection to the engine (drive (with gear or pulley), direct connection to the electric motor using couplings). Pulley driven pumps are rare today.

## 2.2 Design and basic parameters

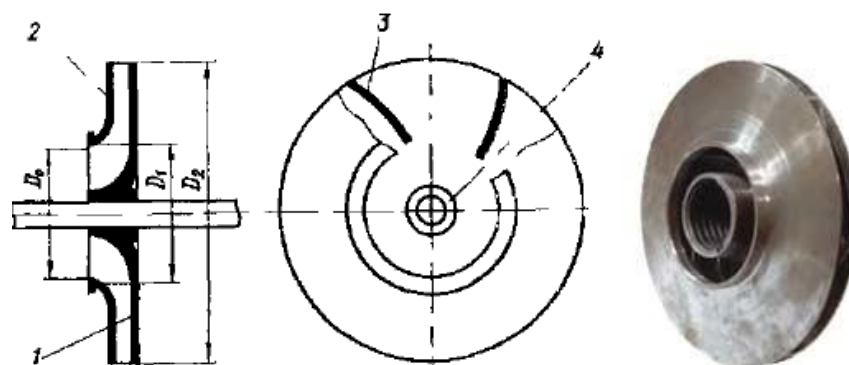
The main parts of a centrifugal pump (Fig. 4) are: pump housing 6 with suction 1 and discharge 3 nozzles. Inside the housing, there is an impeller 4, rigidly mounted on the shaft 2. In the housing around the impeller, a guide apparatus 5 is mounted.



Picture 4 - Diagram of a Centrifugal Pump

The pump housing with nozzles serves to approach the fluid to the impeller and to drain the fluid after the impeller has been exposed to it in the discharge pipe. During rotation, the impeller directly affects the liquid with its blades, and

also creates a field of centrifugal forces inside the pump due to the energy of the engine.



Picture 5 - Working wheel

Typically, the impeller of a centrifugal pump (Pic. 5) consists of two disks: one flat with a sleeve and the second has the form of a wide ring 2. Between the disks, the impeller blades 3 are mounted, forming expanding channels. In the central part of the wheel there is a sleeve 4, with which it is mounted on the shaft. All of the listed components of the impeller are made in the form of a single casting or by welding. The impeller is most often cast from cast iron or bronze, less often from cast steel, and in special cases, for pumping caustic fluids, from lead, rubber, ebonite, ceramics, and the like. Due to the low availability of the internal channels of the impellers, their processing is possible only by hand, and therefore it is very important to have a clean casting. The efficiency depends on how thoroughly the processing and cleaning of the working surfaces of the wheel can be made and the degree of cavitation stability of the pump. On this side, the use of bronze is more preferable. It is better poured and processed. According to the conditions of strength in cast iron wheels, peripheral speeds are permitted, no more than 40-50 m / s. In bronze they can be somewhat large and with good quality they can reach 80 m / s. By their design, the impellers are closed or open, i.e., without a cover disk with open blades. The blades may be cylindrical or spatial with a surface of double curvature. Open wheels are usually used at low pressures and especially thick or contaminated liquids, which is convenient in terms of the availability of impeller channels for cleaning.

In normal centrifugal pumps, the wheels are made of a closed type, since the absence of a cover disk reduces the pressure created by the wheel and increases slotted fluid flows. In closed wheels, both of its discs are usually cast at the same time with the blades, although riveted wheels are found, mainly in small sizes.

In large pumps, rotor blades are sometimes made of steel stamping and poured into a cast-iron rim. In wheels with a speed of up to  $NS = 100$ , the wheel blades have a bend in one plane, i.e., their surfaces are cylindrical.

With an increase in the degree of speed and a decrease in the ratio, in order to increase the working surface of the blade, its inlet edge begins almost from the sleeve. Since in this case, all edge points will have different peripheral speeds, the surface of the blade turns out to be of complex curvature.

On the shaft, the impeller is usually fastened with one or two dowels, less often with a thread.



Picture 6 - Pump shaft

The pump shaft is usually made of forged open-hearth steel, and, in critical cases, alloyed with the addition of chromium, nickel, vanadium. To protect the shaft from wear or direct exposure to the fluid, it is sometimes lined with bushings, and in a highly corrosive environment it is made of special grades of stainless steel.

Due to the high speed of centrifugal pumps, their shafts are calculated at a critical speed. Shafts are rigid if their operating speed is below critical, and flexible if they are above criticism. Flexible shafts are rarely used in pumps. To ensure a smooth-running, as well as the possibility of passing through a critical number of revolutions, the pump rotor, i.e., the shaft with the parts mounted on it (wheels, clutch, disks), must be carefully statically and sometimes dynamically balanced on special machines. A very small imbalance of the rotating masses is enough to cause

the shaft to oscillate, causing its additional deflection, which is dangerous for the shaft strength.



Picture 7 - Oil Seals

The seals are installed in the space between the casing and the shaft at the place of its exit from the pump to the outside and serve the purpose of sealing. The seal located on the suction side must not let air into the pump. The gasket on the discharge side must prevent leakage of fluid from the pump. Normally, the seals of centrifugal pumps have a soft packing, the material for which is hemp, cotton, paper yarn, asbestos cord, saturated with lard along with graphite. The stuffing box on the suction side is equipped with a water shutter consisting of a ring to which fluid is supplied from the pressure line, thereby blocking the access of air into the pump. In acid pumps, such a shutter is carried out by a special fluid. When pumping liquids with an elevated temperature, the seals must have cooling shirts.



Picture 8 - Bearings

The bearings of centrifugal pumps have mainly cast-iron liners to Babbitt filling. Ring lubrication, sometimes with oil cooling with a water jacket or coils. Ball and roller bearings with liquid or grease are also widely used.

Water-lubricated bearings are also used here: rubber, textolite, bakout, etc. The axial forces acting on the pump rotor are perceived by ball heels, and with significant forces - by friction heels of the Kingsbury or Michell type.

The pump casing is usually made of cast iron and only at pressures above 40-50 am steel is used. The internal channels of the casing should have as smooth walls as possible since a large roughness at significant fluid velocities can significantly reduce the pump efficiency. As already indicated the pump housing can be integrated with a connector only along the axis of the pump or in the form of separate sections fastened with tie bolts. In the first case, casting is more difficult, but the installation of the pump is much easier since the disassembly of pipelines is not required and when removing the cover, the entire rotor can be removed from the housing. To connect the fittings - pressure gauge, vacuum gauge, air valves for venting when filling the pump, priming devices, drain valves - the housing is equipped with corresponding holes.

The guide apparatus in most cases, except for purely special purposes, is made of cast iron. A bronze apparatus is preferable in the sense of the possibility of obtaining smoother surfaces of its channels and the ease of their cleaning.

Sealing rings are made of cast iron, bronze, and in case of possible wear when pumping contaminated liquids, also of steel with quenching or carburizing. In modern practice, rubber sealing rings have become used.

Based on the functional purpose of the pump, the determining technical parameters are the supply and pressure (pressure).

Supply is the volume of fluid supplied by the pump per unit of time, expressed in  $\text{m}^3/\text{hr}$  (cubic meters per hour) or  $\text{l} / \text{s}$ , (liters per second). It is designated "Q".

The pressure is the difference in the specific energies of the liquid in the sections after and before the pump, expressed in meters of water. It is designated "H".

In positive displacement pumps use the term "pressure" expression – adjoint in atmospheres ( $\text{kgf} / \text{cm}^2$ ) or mega pascals (MPa) (one mega pascal is equal to 10 atmospheres).

### **2.3 Systems of adjustable electric pumps**

Technological progress in the field of adjustable asynchronous electric drives became possible with the advent of powerful semiconductor devices - thyristors (single-operation and lockable), powerful transistors (MOS field-effect transistors and bipolar transistors with insulated gate).

With an unregulated electric pump drive, the following methods of regulating the pressure in the water supply of the water supply system are possible:

- maintaining pressure with the help of additional water tanks at a certain height. When this is supported by the pump defined is not shared water level by periodic switching on and off the motion Tor pump;

- regulation of the outlet pressure from the increasing pump station by moving the pipeline valves. At the same time, the engine and pump operate constantly with a nominal speed;

- stepwise regulation of the number of running pumps in parallel or in series.

The listed methods have disadvantages:

- the presence of expensive structures of water reservoirs;
- loss of electricity during partial engine load during throttle regulation of the pipeline;

- the presence of additional devices for controlling valves.

A more rational method of maintaining constant pressure and controlling water flow (pump capacity) is the method of changing the pump wheel speed. By adjusting the speed, the created pressure and water supply are changed.

Depending on the type of the current and drive motors species turbo mechanisms existing systems to vary the pressure and produce.

Performance can be classified as follows:

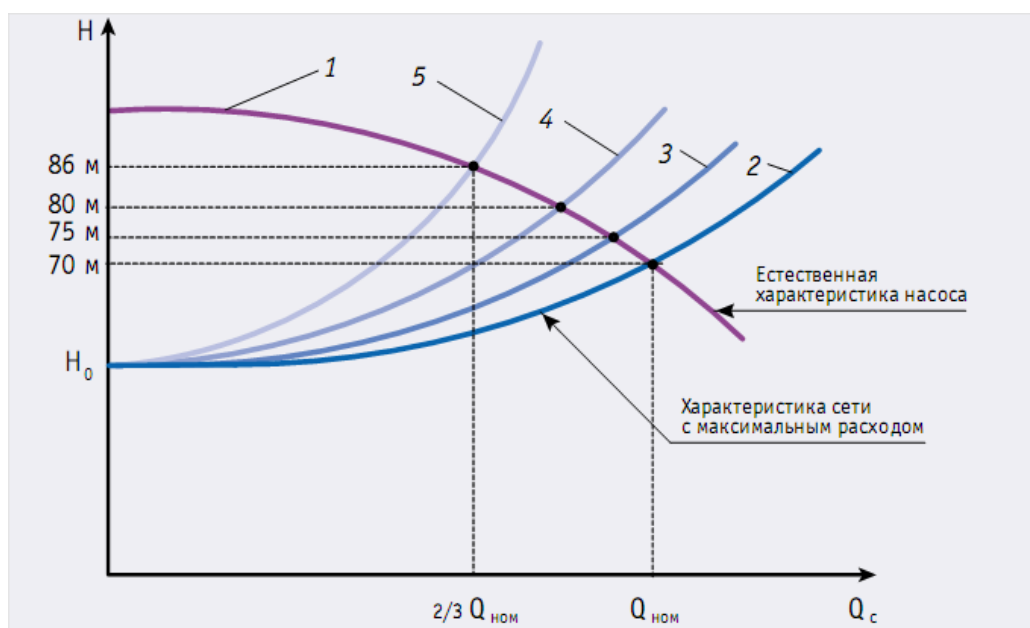
1. Drive systems with DC motors.
2. Adjustable drive systems with synchronous motors.
3. Adjustable drive systems with the induction of a short-time engine (BP) based on the mechanical speed controllers and electric couplings.
4. Drive systems with multi-speed AM.

5. Adjustable drive systems with asynchronous motors with a phase rotor.
6. Drive systems with AM and voltage regulator.
7. Drive systems with frequency converter and AM.

Depending on technical and economic indicators, when transferring existing unregulated electric drives of turbo mechanisms based on squirrel-cage asynchronous motors to an adjustable electric drive, drive systems with a voltage regulator and drive systems with a frequency converter are most likely to satisfy.

## 2.4 Pump operation and cavitation

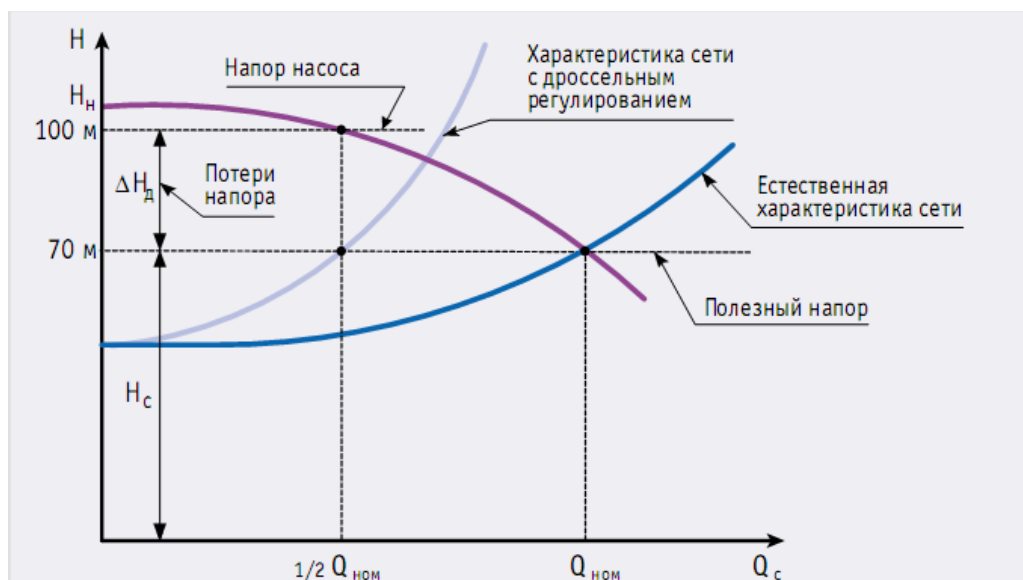
Consider the operation of the process from the point of view of changing the parameters of the network load  $Q_c$ . To do this, we use the well-known QH characteristics for pumping units and the network (Pic. 9). Curve 1 corresponds to the pressure characteristic of the pump unit, and curve 2 to the hydraulic characteristic of the network, where  $H_0$  is the required static pressure of the network. The intersection point of these characteristics is an ideal design point for the joint operation of the pump unit and the network ( $Q_{nom}$ ). When the flow rate in the set changes, its hydraulic characteristic also changes – lines 3-5. Accordingly, the intersection points of the characteristics will shift. As can be seen from the figure, with a decrease in flow, the pressure in the network increases.





Picture 9 - Characteristics of the pump unit and network without pressure regulation

In addition, during operation, depending on the operating conditions of the system, the pressure in front of the pump created by the water supply source may change. Changes in this pressure are also reflected in the pressure in the consumer network. This nature of the relationship of parameters requires the installation of throttle control elements of control valves in the system (sometimes their role is played by pressure valves of the units). These elements create additional hydraulic resistance and allow for stable pressure in the main pipeline. When using throttle elements, the pressure is distributed on the elements of the system. This pressure distribution is shown in Pic. 10, where  $\Delta H_d$  - pressure drop on the throttle element.

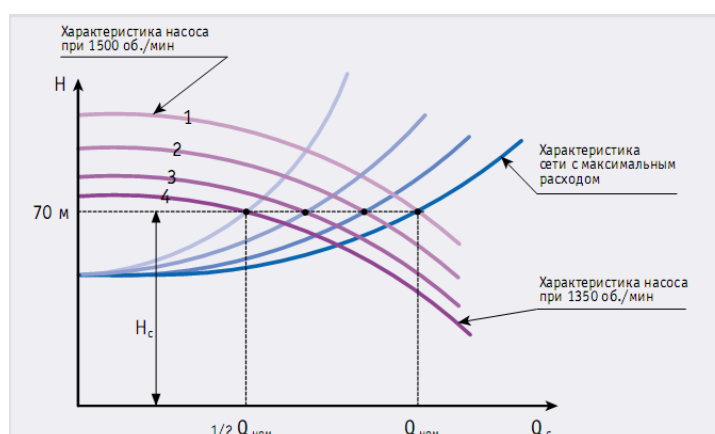


Picture 10 - Characteristics of the pump unit and the network with a throttle regulation

To maintain a given pressure in the network pipeline, when the fluid flow rate changes, the hydraulic resistance of the control element must be changed. In this case, the overall hydraulic characteristic will have a steeper look. The value of  $\Delta H_d$  with this regulation is steadily increasing. Thus, the deeper the throttling is performed by the regulating element, the more energy losses the entire process has.

The amount of losses during throttle control is affected not only by the regulating element: most often at the design stage a pump unit with a certain pressure head is selected, and when replacing pump units, new equipment may have somewhat higher pressure characteristics. In addition, the range of input pressure changes (in front of the suction pipe of the pump unit) affects the pressure behind the pump unit. All these circumstances lead to the fact that energy losses during the process become quite large, reaching 45 percent or more of the rated power of the unit.

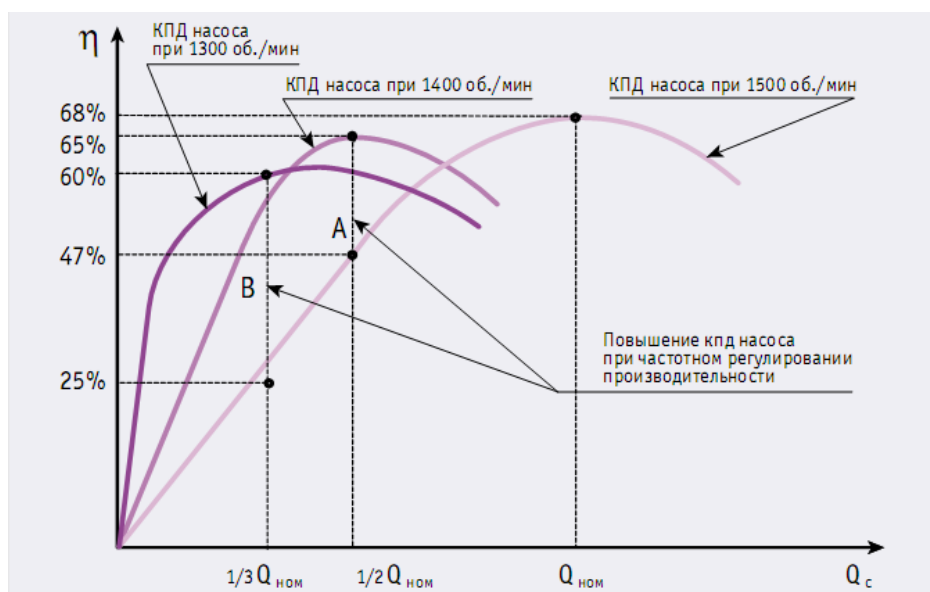
To solve the problem of minimizing losses associated with regulating the pressure in the network, it is necessary to exclude additional hydraulic resistances in the area from the pumping unit to the network pipeline, that is, it is necessary to completely open all the shut-off and control valves. This can be done if the pressure control process is transferred to the pump unit. The theory of operation of superchargers (pumps and fans) proves that changing the speed of the supercharger drive changes its pressure characteristics. In addition, the pressure generated by the supercharger is proportional to the square of the unit speed. The change in pressure characteristics of the pump unit with a change in speed is illustrated in Pic. 11, in which curve 1 corresponds to the nominal (at the nominal speed of the drive) pressure characteristic, and curves 2-4 to the pressure characteristics at a reduced speed.



Picture 11 - Characteristics of the pumping unit and network with frequency regulation

If we organize the operation of the drive of the pumping unit in such a way that when changing the parameters of the technological process (flow rate in the network and pressure at the inlet of the unit), it changes the speed, then as a result, it is possible to stabilize the pressure in the consumer network without significant energy losses. With this method of regulation, pressure losses are eliminated (there are no throttle elements), and, therefore, losses of hydraulic energy.

The method of regulating the pressure in the network by changing the speed of the drive of the pump unit reduces power consumption for another reason. Actually, the pump as an energy conversion device has its own coefficient of performance - the ratio of mechanical energy applied to the shaft to the hydraulic energy received in the pressure pipe of the pump unit. The nature of the change in the pump efficiency  $\eta_n$  depending on the flow rate  $Q$  at various rotational speeds is shown in Pic. 12.



Picture 12 - Change in the efficiency of the pump unit with frequency regulation when changing performance

In accordance with the theory of similarity, the maximum coefficient of efficiency with a decrease in the speed is slightly reduced and shifted to the left. An analysis of the required change in the frequency of the pumping unit with a change in the flow rate in the network shows that with a decrease in flow rate, a decrease in the speed is required. If we consider the operation of the unit for less

than the nominal flow rate (vertical lines A and B), then for these modes it is rational to work at a reduced speed. In this case, the efficiency of the pump is higher than when operating at rated speed. Thus, reducing the rotational speed in accordance with the technological load allows not only to save energy consumption by eliminating hydraulic losses but also to obtain an economic effect by increasing the efficiency of the pump itself - converting mechanical energy into hydraulic energy.

Cavitation in the pumps is explained by a violation of the continuity of the liquid in those places where the pressure decreases to the saturated vapor pressure at a given temperature, while the liquid boils rapidly with the formation of vapor bubbles, which quickly decrease after the transition to the increased pressure zone and the exhaustion of kinetic energy.

The contraction of the cavitation bubble occurs at high speed and is accompanied by a hydraulic shock and a sound pulse. If cavitation bubbles close near the streamlined body, then repeatedly repeated impacts lead to the destruction of the surface of this body (elements of the flow part of the pump). In the places of the destruction of the bubbles, pressure values can reach  $10,000 \text{ kg / cm}^2$  and be accompanied by strong noise with a continuous spectrum from several to thousands of kilohertz.

A qualitative change in the flow structure caused by cavitation leads to changes in the operating mode of the hydraulic machine. These changes are called the consequences of cavitation.

The elements of the flowing part of hydraulic machines are a combination of guide surfaces designed to control the flow. If the cavitation zone arises on such a surface, then it changes its effective shape and, therefore, changes the flow path. Such changes are undesirable and are accompanied by additional energy losses. A decrease in energy parameters (supply, pressure) and a decrease in efficiency are a direct consequence of the occurrence of cavitation in any hydraulic machine.

The fight against cavitation in pumps and other hydraulic machines is of great importance since cavitation leads to the rapid destruction of the elements of the flow path and a decrease in their reliability.

All structural materials are subject to cavitation destruction but to a different degree. The most cavitation-resistant material is austenitic steel due to the uniformity of its structure. In addition to the destruction of the material, cavitation leads to a significant reduction in efficiency, increased vibration, shock loads on the elements of the flowing part and, ultimately, to disrupt the characteristics of  $H$ ,  $N$  and efficiency.

The main means of preventing cavitation, ensuring reliable operation of the pump, is to maintain sufficient excess pressure at the inlet of the pump above the vaporization pressure ( $P_b > P_n$ ), that is, observing a suction height of the pump at which cavitation does not occur. The excess of the pressure at the inlet to the pump above the pressure equal to the saturated vapor pressure of the pumped liquid is called the cavitation reserve  $\Delta h$ .

The cavitation-free operation of the pumps is ensured subject to the condition  $\Delta h \geq \Delta h_{\text{ext}}$  where the permissible cavitation reserve  $\Delta h_{\text{ext}} = k \times \Delta h_{\text{cr}}$ ; safety factor  $k = 1.1 - 1.5$  is set depending on the operating conditions and the type of pump;  $\Delta h_{\text{cr}}$  – cavitation margin corresponding to the beginning of a decrease in parameters (the first critical cavitation mode) during a cavitation test of the pump. Permissible cavitation reserve  $\Delta h_{\text{ext}}$  given in the characteristic of the pump obtained during the cavitation test.